



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO

Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação

Paulo Roberto Silva Marcos

Um simulador de trajetória de VANT de asa fixa aplicado ao monitoramento espectral de radiofrequência

**São Luís
2026**

PAULO ROBERTO SILVA MARCOS

**UM SIMULADOR DE TRAJETÓRIA DE VANT DE ASA FIXA APLICADO AO
MONITORAMENTO ESPECTRAL DE RADIOFREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Ciência da Computação da Universidade Federal do
Maranhão como requisito parcial para obtenção do título
Mestre em Ciência da Computação.

Orientador: Prof. Dr. Alexandre César Muniz de Oliveira

São Luís

2026

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Marcos, Paulo Roberto Silva.

Um simulador de trajetória de VANT de asa fixa aplicado
ao monitoramento espectral de radiofrequência / Paulo
Roberto Silva Marcos. - 2026.

84 f.

Orientador(a): Alexandre César Muniz de Oliveira.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Ciência da Computação/ccet, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, 2026.

1. Otimização-simulação. 2. Monitoramento de
Radiofrequências. 3. Vant. I. Oliveira, Alexandre César
Muniz de. II. Título.

PAULO ROBERTO SILVA MARCOS

**UM SIMULADOR DE TRAJETÓRIA DE VANT DE ASA FIXA APLICADO AO
MONITORAMENTO ESPECTRAL DE RADIOFREQUÊNCIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação da Universidade Federal do Maranhão como requisito parcial para obtenção do título Mestre em Ciência da Computação.

Aprovada em: 15/04/2026

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Alexandre César Muniz de Oliveira
Orientador
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Francisco Glaubos Nunes Climaco
Examinador Interno
Universidade Federal do Maranhão

Prof. Dr. Cláudio Fabiano Motta Toledo
Examinador Externo
Universidade de São Paulo

Dedico este trabalho ao meu pai, Elizeu (in memoriam), ao meu filho, Davi, e à minha mãe, Raimunda, para quem desejo ser, sempre, exemplo de dedicação, honestidade, seriedade e orgulho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, como cristão, agradeço a Deus e ao Nosso Senhor Jesus Cristo pelo dom da vida, pela família que me deram e pela trajetória que percorri até hoje.

Agradeço ao meu pai Elizeu (*in memoriam*), por me servir de exemplo de honestidade, de capacidade técnica, de seriedade, de generosidade, de simplicidade e de retidão moral e legal.

Agradeço à minha mãe, Raimunda, pelo carinho, amor, zelo e dedicação à nossa família, pelos exemplos de generosidade e pela sabedoria abundante.

Agradeço aos meus irmãos, que me incentivaram e motivaram incondicionalmente, e pelos momentos de alegria ao longo da minha vida.

Aos meus colegas de trabalho na Anatel, que me substituíram inúmeras vezes em atividades que, de outra forma, dificultariam minha assiduidade no PPGCC/UFMA.

Agradeço aos meus amigos e colegas de turma, pelo incentivo e pelos bons e construtivos diálogos e pela construção colaborativa de conhecimento.

Por fim, e não menos importantes, agradeço aos meus professores do PPGCC, ao meu orientador, Prof. Dr. Alexandre César Muniz de Oliveira, pela confiança e paciência, por me apresentar novos desafios na ciência da computação, por dedicar seu tempo à profissão mais nobre e importante para a construção de uma nação.

“Os melhores programas são escritos para que as máquinas de computação possam executá-los rapidamente e para que os seres humanos possam entendê-los claramente. Um programador é idealmente um ensaísta que trabalha com formas estéticas e literárias tradicionais, bem como conceitos matemáticos, para comunicar a forma como um algoritmo funciona e convencer o leitor de que os resultados estarão corretos.”

(Donald E. Knuth)

RESUMO

O emprego de veículos aéreos não tripulados (VANTs) em atividades de monitoramento do espectro de radiofrequência é uma das muitas possibilidades de aplicação que este tipo de veículo apresenta, seja de forma autônoma, pré-programado para executar uma rota previamente planejada, ou telecontrolada, e vários são os trabalhos que têm proposto algoritmos para esse fim em diferentes contextos de aplicação. Esta pesquisa propõe um simulador de trajetória a ser executado por VANT de asa fixa, sugerindo rotas que preveem desvio horizontal e vertical, em execução de atividade de monitoramento espectral de sinais de radiofrequência emitidos por estações de transmissão conhecidas e auxiliar na identificação de sinais de estações desconhecidas ao longo do percurso. Como etapa de planejamento, propõe-se abordagem fundada em refinamento de sequência gerada por algoritmos básicos de roteamento empregados no problema do caixeiro viajante (PCV), assim como por modelamento na suíte de otimização Gekko e solver APOPT, aliada à determinação do espaço de busca a partir de características de radiofrequência de estações reais e limiares da relação sinal ruído calculado a partir da seleção de modelo de propagação adequado à faixa monitorada e à altitude hipotética de voo do VANT. Os resultados demonstraram que a minimização realizada pelo algoritmo de escalada resultou em expressiva redução do comprimento da trajetória, que foi simulada adequadamente pelo modelo proposto, considerando a presença de obstáculos extensos, que requerem variação na altitude do voo, bem com desvios no plano horizontal para contornar obstáculos de dimensões reduzidas, auxiliado pela função de consumo de energia, permitindo prever instantes de retorno para reabastecimento e continuidade da sequência inicialmente proposta.

Palavras-chave: Otimização-simulação. Monitoramento de radiofrequências. VANT.

ABSTRACT

The use of unmanned aerial vehicles (VANTs) in radio frequency spectrum monitoring activities is one of the many possible applications of this type of vehicle, whether operating autonomously, pre-programmed to follow a planned route, or remotely controlled, and several studies have proposed algorithms for this purpose in different application contexts. This research proposes a trajectory simulator to be executed by a fixed-wing VANT, suggesting routes that include horizontal and vertical deviations during spectral monitoring of radio frequency signals emitted by known transmission stations, while also assisting in the identification of signals from unknown stations along the path. As part of the planning stage, the approach is based on refining sequences generated by basic routing algorithms used in the traveling salesman problem (TSP), as well as through modeling in the Gekko optimization suite and APOPT solver, combined with the definition of the search space derived from radio frequency characteristics of real stations and signal-to-noise ratio thresholds calculated using a propagation model appropriate to the monitored band and the VANT's hypothetical flight altitude. The results demonstrated that the minimization achieved by the hill-climbing algorithm led to a significant reduction in trajectory length, which was adequately simulated by the proposed model. The simulation considered the presence of large obstacles requiring altitude variation, as well as horizontal deviations to bypass smaller obstacles, aided by the energy consumption function, allowing prediction of return moments for refueling and continuation of the initially proposed sequence.

Keywords: Optimization-simulation. Radio frequency monitoring. VANT.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Exemplo de trajetória não otimizada entre 8 sedes municipais no Maranhão	29
Figura 2 – Matriz de pontos no entorno de três municípios	32
Figura 3 – Ilustração de um movimento a partir do algoritmo de escalada.....	33
Figura 4 – Correção de direção do VANT	40
Figura 5 – Mapa de linhas de transmissão.....	42
Figura 6 – Curva de variação de altitude para desvio vertical de obstáculo	43
Figura 7 – Curva de consumo em relação à velocidade instantânea	44
Figura 8 – Blocos de um sistema de controle clássico	45
Figura 9 – Composição vetorial do efeito do vento.....	45
Figura 10 – Parâmetros do algoritmo reabastecimento	46
Figura 11 – Amostra do mapa de rotas aeronáuticas em torno de São Luís	49
Figura 12 – Etapas da definição da sequência de pontos no <i>grid</i> de SNR	50
Figura 13 – Diagrama em blocos da arquitetura do sistema.....	51
Figura 14 – Diagrama em blocos do núcleo do simulador.....	52
Figura 15 – Espectrograma de emissora sintonizada em 95,1 MHz	56
Figura 16 – Sequência gerada pelo algoritmo de busca exaustiva e vizinho mais próximo	58
Figura 17 – Mapa da relação SNR.....	59
Figura 18 – Refinamento obtido na etapa B	60
Figura 19 – Ilustração de rotas reduzidas a partir da etapa B.....	60
Figura 20 – Convergência do algoritmo de escalada.....	61
Figura 21 – Trajetórias realizadas pelo VANT no simulador	62
Figura 22 – Desvio realizado pelo VANT ao se aproximar da região do aeroporto	62
Figura 23 – Desvio vertical das linhas de transmissão.....	63
Figura 24 – Perfil de consumo instantâneo ao longo da trajetória	63
Figura 25 – Curva da reserva de combustível ao longo da trajetória	64
Figura 26 – Trajetória do vizinho mais próximo considerando reabastecimento.....	65
Figura 27 – Perfil de consumo considerando efeitos do vento e reabastecimento	65
Figura 28 – Detalhe do mapa de sinal de RF no canal monitorado.....	66
Figura 29 – Perfil de sinal ao longo do deslocamento.....	66
Figura 30 – Região de localização da fonte desconhecida	67
Figura 31 – Região de localização da fonte desconhecida	68
Figura 32 – Simulação a partir da resultante das forças sobre o VANT	69

Figura 33 – Efeito da variação do coeficiente k_0	70
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Síntese dos trabalhos relacionados mais relevantes.....	27
Tabela 2 – Modelos de perdas de propagação.....	37
Tabela 3 – Dados de estações de FM	54
Tabela 4 – Dados de estação hipotética emitindo sinais interferentes no ILS LOC	57
Tabela 5 – Quantidade de pontos com $73 \leq \text{SNR} \leq 85$ dB.....	59
Tabela 6 – Resultados obtidos a partir da etapa de planejamento	60
Tabela 7 – Parâmetros de configuração do simulador.....	61
Tabela 8 – Resultados da etapa de simulação.....	62
Tabela 9 – Resultados obtidos em simulação com reabastecimento	65
Tabela 10 – Diferença entre o ponto definido e resultado simulado	67
Tabela 11 – Resultados comparados à simulação de sequência sem refinamento	68
Tabela 12 – Resultados comparados à simulação sem sequenciamento prévio	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADS-B	<i>Automatic Dependent Surveillance-Broadcast</i>
Anatel	Agência Nacional de Telecomunicações
C2	<i>Command & Control</i>
CRFS	<i>Cambridge Radio Frequency Systems</i>
dBk	Unidade logarítmica de potência relativa ao nível de 1 kW de potência
dBm	Unidade logarítmica de potência relativa ao nível de 1 mW de potência
DECEA	Departamento de Controle do Espaço Aéreo
ERP	<i>Effective Radiated Power</i>
FM	Frequência Modulada
HCI	Altura do centro de irradiação de uma antena
IEC	<i>International Electrotechnical Commission</i>
ILS	<i>Instrument Landing System</i>
LOC	<i>Localizer</i>
Mosaico	Plataforma desenvolvida pela Anatel contendo dados de estações
PCV	Problema do Caixeiro Viajante
SANT	Sistemas Aéreos Não Tripulados
SINR	<i>Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio</i>
SNR	<i>Signal-to-Noise Ratio</i>
TSP	<i>Traveling Salesman Problem</i> (mesmo que PCV)
UIT	União Internacional de Telecomunicações (mesmo que ITU)
VANT	Veículo Aéreo Não Tripulado
ZAD	Zona de Aproximação ou de Decolagem

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	14
1.1	Problema e justificativa	17
1.2	Objetivo geral	18
1.3	Objetivos específicos	18
1.4	Contribuições.....	19
1.5	Organização da dissertação.....	19
2	TRABALHOS RELACIONADOS.....	21
3	METODOLOGIA	29
3.1	Modelamento do problema de otimização	29
3.2	Refinamento da solução inicial por escalada.....	32
3.3	O solver APOPT	35
3.4	Propagação dos sinais de radiofrequência.....	36
3.5	Simulador.....	38
3.5.1	Mecanismo da força-atrativa	39
3.5.2	Mecanismo da força repulsiva horizontal.....	40
3.5.3	Mecanismo da força repulsiva vertical.....	41
3.5.4	Função de consumo de energia.....	43
3.5.5	Algoritmo de reabastecimento.....	46
3.5.6	Triangulação de estações não autorizadas	47
3.6	Monitoramento espectral no Brasil.....	48
3.7	Planejamento	50
3.8	Simulador.....	50
4	SIMULAÇÕES E RESULTADOS.....	54
4.1	Contexto do experimento.....	54
4.2	Geração de sequência e refinamento da solução	57
4.3	Execução da simulação imediatamente após a da Etapa A.....	68
4.4	Simulação sem geração de sequência na Etapa A.....	69
4.5	Efeito da variação do valor do coeficiente de força atrativa.....	70
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	71
	REFERÊNCIAS.....	73
	APÊNDICE A - OTIMIZAÇÃO COM APOPT	78

1 INTRODUÇÃO

O espectro de radiofrequências é recurso escasso, constituindo-se bem público (Brasil, 1997). Em geral, o monitoramento desse recurso advém da competência atribuída por lei a entidades governamentais para garantir que apenas entidades autorizadas o utilizem adequadamente, evitando o surgimento de interferências causadas por elas quando há mau funcionamento ou modificações não autorizadas em suas estações (Carlson, Crilly, 2010, p. 49), assim como para a detecção de fontes de emissão de radiofrequência não autorizadas, ou, em outras palavras, identificação de estações emissoras clandestinas.

No Brasil, a administração desse recurso foi atribuída à Agência Nacional de Telecomunicações (Anatel) pela lei n.º 9.472, de 16 de julho de 1997, que o disciplinou por meio da Resolução Anatel n.º 772, de 16 de janeiro de 2025, que dispõe sobre a atribuição ou destinação do espectro de radiofrequências empregada pelos sistemas de telecomunicação sem fio no Brasil e é atualizada a cada ano em função da dinâmica do setor, em que serviços novos requerem faixas de radiofrequência ocupadas por outros serviços com baixa utilização¹.

Nesse instrumento normativo, as faixas em utilização do espectro de radiofrequências se apresentam entre 3 kHz e 3.000 GHz e são empregadas desde serviços de radiocomunicação analógicas até sistemas de transmissão de dados digitais entre estações terrestres e satelitais (ANATEL, 2025). Segundo a União Internacional de Telecomunicações (ITU, 2011a, p. 40), como atividade de gestão do espectro, o monitoramento do seu uso pode ser realizado por estações fixas, móveis ou transportáveis, devendo-se considerar, ainda, a possibilidade de utilizá-las em conjunto ou de forma combinada.

No que concerne às estações móveis, isto é, instaladas em automóveis, estas podem ser empregadas para realizar o monitoramento do espectro em atividades de, por exemplo, medições de interferência ou detecção e localização de emissões não autorizadas (ITU, 2011b, p. 4), apresentando vantagens como a possibilidade de monitoramento espectral de estações de baixa potência ou sistemas que empregam antenas com alta diretividade ou alta frequência ou mesmo locais cujas características de propagação impossibilitam a realização de medições por estações fixas. Entretanto, surgem como desvantagens a exposição dos equipamentos de alto custo a locais de riscos diversos, acidentes e custos gerais deslocamento (ITU, 2011b, p. 2).

¹ Um exemplo está na alocação da faixa de radiofrequência dos últimos canais do serviço de radiodifusão de sons e imagens analógica para o serviço celular 4G. Disponível em: <https://tecnoblog.net/noticias/anatel-4g-700-mhz-todas-capitais/>. Acesso em: 17 jul. 2025.

Embora existam desafios de naturezas diversas, contrariamente aos desafios encontrados nas estações fixas, a dispensa da necessidade de alocação de propriedade privada, montagem, manutenção e vigilância constante da estação constituem um conjunto de vantagens que demonstram que o monitoramento espectral por meio das estações móveis é uma opção a ser considerada pela facilidade de implementação, emprego em locais variados segundo cada demanda, manutenção e guarda.

Nesse contexto, as tecnologias emergentes que envolvem o uso de veículos aéreos não tripulados (VANT) estão ganhando destaque na atividade de monitoramento para as mais diversas finalidades como na agricultura (Amaral *et al.*, 2020); arqueologia (Casana *et al.*, 2021), infraestrutura (Toriumi, Bittencourt, Futai *et al.*, 2023); no monitoramento ambiental (Motlagh *et al.*, 2023); transporte de mercadorias (Schmidt; Saraceni, 2024); aplicações militares (Lashari, Ali, Massan, 2019), assim como soluções que visam à supervisão de missão e segurança do voo em sistemas autônomos, como em Arantes (2019), entre outros.

No campo do monitoramento do espectro de radiofrequências, comercialmente, a *Cambridge Radio Frequency Systems* (CRFS) implementou uma solução de monitoramento utilizando um sensor *RFEye Node 100-18LW* em um VANT modelo *Tekever AR-5²* de asa fixa capaz de voar a 100km/h em velocidade de cruzeiro e com autonomia de 20 horas de voo (CRFS, 2025, p.10), apto a monitorar a faixa espectral até 18 GHz, abrangendo praticamente todos os serviços de interesse público e privado.

Embora não sejam de baixo custo em soluções profissionais, uma das possíveis aplicações dos VANTs é o monitoramento espectral de radiofrequências por meio de hardware compacto para monitoramento do espectro de radiofrequência. Benefícios dessa integração residem em melhorar a linha de visada (LoS), o raio de observação, funcionamento *standalone*, integração de inteligência sob múltiplos aspectos (CRFS, 2024, p. 4). De acordo com a ITU (2021), sistemas de monitoramento instalados em um VANT são conceitualmente idênticos aos equipamentos de monitoramento e teste de rádio já conhecidos, havendo limitações em termos de tipo, tamanho e peso, visto que a capacidade do VANT limita esses aspectos.

O próprio uso dos VANT em atividades de monitoramento em outras áreas ou serviços diversos depende de faixas espectrais livres de sinais indesejados, não autorizados ou interferentes, uma vez que tais aplicações em geral requerem comunicação constante do VANT com a base terrestre de controle por meio de links C2 (*command & control*), que pode ocorrer

² Disponível em: <https://www.tekever.com/models/ar5>. Acesso em: 12 jun. 2025.

por meio de sistemas e protocolos diversos, tais como banda-C, ADS-B, WiFi, 5G, 6G, MANET (CRFS, [2024?]).

O monitoramento espectral realizado em voo apresenta facilidades e desafios que devem ser adequadamente tratados, considerando, ainda, que os recursos gastos são governamentais e, portanto, devem ser otimizados. Quando os instrumentos são montados em estações fixas, essas devem ser devidamente alocadas de modo a abranger a maior área com o menor número delas (ITU, 2011a, p. 40). Quando montados em veículos terrestres, as rotas a serem cumpridas devem ser desenhadas de modo a minimizar o gasto de combustível com o máximo de regiões monitoradas, principalmente quando combinadas com as estações fixas (ITU, 2011a, p. 33).

Na hipótese de ser empregado o VANT na atividade de monitoramento espectral, as rotas devem ser planejadas de modo a abranger o maior número de pontos de interesse (estações conhecidas) conjugado com a minimização do percurso a ser realizado e energia consumida (Franco, Buttazzo, 2015), considerando os obstáculos físicos como que devem ser evitados, tais como linhas de transmissão, torres, edifícios, e ou zonas de segurança definidas pela regulamentação nacional, tais como os refinarias, plataformas e exploração de petróleo, zonas de aproximação e decolagem de aeródromos (DECEA, p. 54).

Sistemas dessa espécie podem registrar os sinais recebidos em uma trajetória projetada para monitorar estações conhecidas e, como atividade paralela, detectar sinais de estações desconhecidas ao longo da execução dessa trajetória, bem como indícios de alterações de potência de transmissão em estações autorizadas. São vastas as possibilidades de fiscalização e monitoramento em vários contextos que esse meio de transporte proporciona aos órgãos públicos.

Estudos recentes abordam o problema de roteamento voltado a vários contextos, tais como missões de busca e resgate em ambientes desconhecidos por meio do algoritmo ACSQL³ que aprimora estados, ações e recompensas no aprendizado por reforço (Wu *et al.*, 2023); localização de múltiplos objetos em cenários de desastres baseado em aprendizado por reforço (RL) para que um VANT encontre autonomamente a trajetória que resulte em menor tempo e com menor comprimento de rota (Ebrahimi *et al.*, 2020); minimização do consumo de energia do VANT e planejamento de trajetórias de voo por meio da construção de mapa de rádio e da aplicação do algoritmo de Dijkstra aprimorado, com a finalidade de alcançar caminhos curtos e comunicação confiável (Deng *et al.*, 2024).

³ Acrônimo para *Adaptive Conversion Speed Q-Learning Algorithm*.

É nesse contexto que o presente trabalho se dedica a estudar e a propor uma solução inicial que parte do planejamento à simulação das rotas do VANT na atividade de monitoramento espectral de radiofrequência tomando a distribuição de estações de radiodifusão em FM e a faixa de radionavegação aeronáutica como exemplo de contexto de aplicação. Ressalta-se que o simulador proposto se aplica a qualquer faixa de radiofrequência em uso na atualidade por estações que suportem antenas externas a partir do simples ajuste de parâmetros.

Não se pretende explorar ou comparar algoritmos na etapa de definição da rota, pois para essa etapa propõe-se uma metodologia que apresenta bom compromisso em resultado e simplicidade computacional, uma vez que o enfoque desta pesquisa se dá na proposta de um simulador aplicado ao monitoramento espectral cujo movimento é definido por atração e repulsão em analogia às forças de campo, que forneça a sequência de pontos a ser cumprida por um VANT hipotético.

1.1 Problema e justificativa

O uso do espectro de radiofrequências é objeto de constante fiscalização pela Anatel (2016). O uso é efetuado tanto por entidades devidamente autorizadas, quanto por entidades não autorizadas, denominadas clandestinas (Brasil, 1997). Atualmente, a atividade de monitoramento é efetuada por estações fixas e por estações transportáveis em veículos terrestres. Entretanto, o uso crescente de VANT para as atividades de monitoramento tem despertado interesse do seu uso nessa atividade, como no Canadá, Estados Unidos e países da União Europeia (Winnf, 2021), tanto é que a ITU publicou Report ITU-R SM.2486-1 sobre o tema⁴.

Um estudo sobre a indústria brasileira e europeia de veículos aéreos não tripulados de 2016 apontou que (MICES, 2016, p. 8):

Os avanços têm chegado na forma de capacidades tecnológicas, regulamentação e apoio de investimento, proporcionando muitas novas possíveis aplicações para SANTS – Sistemas Aéreos Não Tripulados [equivalente ao VANT] (UAS - Unmanned Aircraft Systems), e, conforme continua a evolução tecnológica, pode-se esperar que surgirão muitos outros casos de uso.

Considerando-se, portanto, a implementação de um sistema de monitoramento espectral em um VANT comercial do tipo asa fixa, pergunta-se: qual rota deverá percorrer esse veículo para executar o monitoramento espectral adequado da área ou estações de interesse com

⁴ Disponível em: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-SM.2486-1-2024-PDF-E.pdf. Acesso em: 05 jun. 2025.

o menor percurso possível? Quais restrições de radiofrequência devem ser obedecidas para garantir a leitura adequada das estações conhecidas e identificar a existência de estações desconhecidas ou clandestinas?

Assim, no sentido de proporcionar redução no gasto de energia necessária para essa atividade, considerando ainda que essa minimização manterá, como consequência, o VANT em voo no menor tempo possível para evitar impacto na utilização do espaço aéreo por outras aeronaves, notadamente as comerciais de passageiros e de cargas, propõe-se a implementação de um sistema de planejamento e simulação de trajetória de VANT apto a realizar o monitoramento espectral de determinada faixa de radiofrequência por meio de rota minimizada.

1.2 Objetivo geral

O objetivo geral da presente pesquisa é propor uma solução computacional voltada à atividade de planejamento e simulação de trajetórias a aplicadas ao contexto dos veículos aéreos não tripulados (VANT) de asa fixa aplicados ao monitoramento espectral de radiofrequência em grandes áreas, incluindo cenários intermunicipais, por meio de abordagem que segue a analogia ao movimento provocado interação de forças de campo, capaz de adaptar dinamicamente a trajetória a partir de parâmetros de propagação de sinais, restrições do ambiente e regiões de interesse..

1.3 Objetivos específicos

Como objetivos específicos, enumera-se:

- a) formalizar o problema de planejamento de trajetórias no contexto do monitoramento espectral de radiofrequência, estabelecendo sua relação com o Problema do Caixeiro Viajante (PCV) e suas especificidades;
- b) selecionar e adaptar algoritmos de roteamento e otimização como base para o planejamento da sequência de pontos a serem visitados pelo VANT, bem como para o refinamento da trajetória gerada;
- c) analisar modelos de propagação de radiofrequência e selecionar aquele mais adequado às condições do cenário de simulação considerado; e
- d) desenvolver e implementar um modelo de simulação para o movimento do VANT baseado na analogia forças de campo, capaz de orientar a trajetória em direção às regiões de interesse e de evitar obstáculos e zonas restritas.

1.4 Contribuições

A presente pesquisa tem como meta a contribuição na atividade de monitoramento espectral a ser executada por VANT no que tange ao planejamento da rota de voo, reduzindo gasto de energia e decurso de tempo, com vistas a proporcionar o monitoramento adequado de estações conhecidas, se posicionando tão próximo quanto necessário, ao mesmo tempo em que proporciona proteção do sensor de RF instalado no VANT, permitindo ao ente público, quando da implementação de um sistema de monitoramento do espectro de radiofrequências autônomo ou telecontrolado, o direcionamento do planejamento e previsão da trajetória a ser cumprida de acordo com a missão pretendida.

Ainda, o modelo a ser empregado em sistemas de monitoramento espectral poderá ser dedicado para monitoramento em outros contextos por meio da substituição da camada de sinais de radiofrequência por camada de outra grandeza a ser monitorada, como temperatura ambiental em locais relevantes, vegetação verde, emissões de luz infravermelha apresentando focos de incêndios a partir de registros satelitais. Além disso, almeja-se incentivar o emprego desse meio de transporte, que vem apresentando diariamente inovações em atividades de monitoramento, proporcionando novas abordagens ao exercício das atividades do poder público.

1.5 Organização da dissertação

No intuito de estruturar de maneira didática e logicamente encadeada, o trabalho foi estruturado seguindo a seguinte organização:

- a) o Capítulo 2 apresenta o levantamento dos trabalhos relacionados ao planejamento de trajetória de VANTs em variados contextos e diferentes técnicas;
- b) o Capítulo 3 exhibe a metodologia empregada no estudo, abrangendo o modelamento do problema de otimização do PCV, incluindo a geração da solução inicial a partir de parâmetros básicos e seu posterior refinamento considerando restrições de radiofrequência derivadas do modelo de propagação, bem como são detalhados os modelos de forças atrativa e repulsiva do VANT, a função de consumo de energia, considerações de reabastecimento e o algoritmo básico de radiolocalização, além do contexto de aplicação do estudo.

- c) o Capítulo 4 detalha o contexto dos experimentos por meio da aplicação da fundamentação teórica apresentada no contexto de prova selecionado, tendo como ponto de partida a faixa espectral e a estações emissoras a serem monitoradas, aspectos de voo e do mecanismo de movimento do VANT, a execução dos algoritmos de otimização e a posterior execução da rotina de simulação, de onde se extrairá a trajetória a ser executada pelo VANT e o perfil de radiofrequência a partir do log dos sinais obtidos ao longo da trajetória; e
- d) o Capítulo 5 ostenta as conclusões e considerações finais relacionadas às limitações do atual estágio do modelo e a possibilidade de aplicações em trabalhos futuros.

A seguir, conforme supra descrito, serão apresentados os trabalhos relacionados ao presente estudo, seguido pelos aspectos matemáticos do modelamento do problema de otimização e a fundamentação teórica acerca dos vários aspectos pertencentes ao objeto da pesquisa.

2 TRABALHOS RELACIONADOS

O problema de planejamento de roteamento de rota para VANT vem sendo tratado por diversas abordagens por meio de pesquisas que exploram heurísticas e meta-heurísticas no sentido de propor soluções para otimização de rotas planejadas em vários cenários. Abaixo são descritos resumidamente alguns desses trabalhos.

Hindumathi *et al.* (2025) comparou, em ambiente MATLAB, quatro algoritmos de planejamento de rotas, quais sejam, Dijkstra, A*, RRT e RRT, avaliando consumo de bateria, distância percorrida e eficiência de tempo. Os autores executaram as simulações em um contexto de navegação de VANTs em ambientes com obstáculos, representados em forma de grades e espaços contínuos. A implementação foi realizada em ambiente MATLAB, onde avaliaram o desempenho considerando distância percorrida, tempo de execução e consumo de bateria.

No caso dos algoritmos baseados em grafos (Dijkstra e A*), o ambiente foi modelado como uma malha de células com custos de movimento, sendo 10 para movimentos horizontais e verticais e 14 para os movimentos em diagonal, incluindo obstáculos que foram representados por células bloqueadas, constituindo um ambiente fictício. Por outro lado, para os algoritmos de amostragem (RRT e RRT*), o contexto foi projetado em um espaço contínuo com obstáculos, onde pontos aleatórios eram gerados para expandir árvores de busca até alcançar o destino.

Cabe destacar que o percurso a ser executado pelo VANT é definido por porto de partida e destino distintos, sem exigências de cumprimento de missão em diversos pontos. Os autores concluíram que o método de Dijkstra garante sempre o caminho mais curto, mas é lento em áreas grandes ou complexas. O A* melhora esse desempenho ao usar heurísticas, tornando a busca mais rápida sem perder a qualidade. Já o RRT encontra rapidamente uma rota viável por meio de amostragem aleatória, sem priorizar a otimização, enquanto o RRT* aperfeiçoa esse processo, encurtando e simplificando o trajeto. É importante destacar

Deng *et al.* (2024) abordaram o planejamento de rotas de VANTs de carga em cenários urbanos de logística de curta distância, considerando múltiplos usuários para coleta e entrega, partindo do depósito, realiza as tarefas e retorna, mantendo sempre conexão confiável com a estação base terrestre (GBS), buscando minimizar energia e otimizar trajetórias, em um contexto construído em mapa de rádio da área-alvo, sendo aplicando o algoritmo de Dijkstra aprimorado para calcular rotas curtas e confiáveis entre pontos de acesso, seguido de um algoritmo genético híbrido (HGA) para resolver o problema de trajetória de coleta e entrega (PDP) com eficiência energética.

Foi verificado que o esquema proposto de roteamento e otimização de sequência de entregas conseguiu reduzir significativamente o consumo energético dos VANTs em comparação com métodos tradicionais para solução do PDP, tais como o CPLEX e OR-Tools. Nos experimentos, realizados em um cenário urbano com múltiplas estações base e dez pares de coleta e entrega, o algoritmo híbrido genético (HGA) aliado ao Dijkstra modificado priorizou trajetórias que equilibravam qualidade de comunicação e peso da carga transportada.

O resultado da análise revelou que o consumo total de energia no PDP com mínimo consumo foi de aproximadamente 522.041 J, enquanto no PDP baseado apenas em menor distância chegou a 656.475 J, representando uma economia de cerca de 20%. Além disso, os gráficos de potência instantânea mostraram que o VANT operou com valores médios de potência mais baixos e permaneceu menos tempo em regimes de alta potência, o que confirma maior eficiência. É possível destacar outro resultado importante do algoritmo proposto, que consistiu em evitar transportar cargas pesadas por longas distâncias, ajustando a ordem de entregas para reduzir esforço energético.

Ahmad *et al.* (2024) propuseram uma abordagem chamada GW-A*, que combina o algoritmo A* com o otimizador *Grey Wolf* (GWO). Verificou que o método aprimora o A* tradicional ao usar nós ponderados, cujos pesos consideram a distância de obstáculos e são otimizados pelo GWO aplicado em planejamento de rotas de VANTs em ambientes dinâmicos com obstáculos e pistas móveis de pouso. Nas simulações verificam que com fatores dinâmicos, como direção e velocidade do vento, o GW-A* demonstrou desempenho superior ao A* em diversos cenários, oferecendo rotas mais eficientes e maior adaptabilidade.

O contexto empregado no estudo consistiu em um ambiente dinâmico em duas dimensões, no qual um VANT quadricóptero precisava interceptar uma estação de pouso móvel enquanto navegava por entre obstáculos fixos e enfrentava os efeitos do vento. O cenário foi modelado em uma grade de 8000 m², dividida em células de 10 × 10 m, contendo corredores estreitos, áreas abertas e grupos densos de obstáculos, simulando diferentes condições espaciais.

O VANT foi configurado para efetuar voo em altitude constante e com velocidade superior à da estação de pouso, exigindo continuamente a realização do cálculo de pontos de interceptação ao longo da trajetória. Durante os testes, foram introduzidas condições de vento variáveis, com diferentes velocidades e ângulos de impacto, geradas aleatoriamente para representar situações reais de perturbação. O objetivo consistiu em avaliar a eficiência do método proposto, ou seja, o GW-A, que resulta da combinação do algoritmo A com o *Grey Wolf Optimizer*, em comparação ao A* tradicional, verificando se o VANT conseguia ajustar

dinamicamente seus pesos de nós e manter trajetórias seguras e eficientes diante das mudanças ambientais

Os pesquisadores concluíram que o algoritmo proposto, o GW-A*, combinação do A* com o *Grey Wolf Optimizer*, apresentou desempenho superior ao A* tradicional na maioria dos cenários testados em ambientes dinâmicos. Nos experimentos, que incluíram diferentes condições de vento e obstáculos fixos, o GW-A* conseguiu gerar trajetórias mais eficientes, adaptáveis e seguras, interceptando a estação de pouso móvel com maior precisão.

Ha (2024) propôs um algoritmo eficiente para detecção de poluição do ar em áreas urbanas usando VANTs, baseado em uma versão aprimorada do A*, incorporando pesos especiais para calcular a probabilidade de existência do alvo, considerando heurísticas de expectativa, dados coletados pelos sensores do drone e informações prévias sobre obstáculos. A aplicação do algoritmo em ambientes estocásticos é detalhada, e simulações práticas demonstraram sua superioridade em relação a outros métodos, alcançando mais de 45% de melhoria no número de buscas bem-sucedidas.

Nesse estudo, a consideração inicial reside na dificuldade de localizar fontes de poluição atmosférica, que são invisíveis e variáveis em um ambiente de busca probabilística, em que cada célula da área urbana possui uma probabilidade de conter uma fonte de poluição. Propondo um algoritmo A* aprimorado para guiar drones em missões autônomas de busca.

Nesse cenário, o VANT explora o espaço urbano coletando dados de gases e fumaça por meio de sensores, enquanto o algoritmo considera múltiplos fatores, tais como informações heurísticas sobre a distância até o alvo, pesos associados a obstáculos presentes no ambiente, dados coletados em tempo real pelos sensores do drone e probabilidades derivadas de modelos estocásticos baseados em Bayes.

Como resultado, o algoritmo A aprimorado proposto para detecção probabilística de poluição do ar com VANTs apresentou desempenho superior em relação aos métodos estocásticos existentes. Ao incorporar novos pesos, como estimativas heurísticas do alvo, informações de obstáculos e dados coletados pelos sensores do drone, o algoritmo conseguiu reduzir tempo e distância de busca e, ao mesmo tempo, aumentar a probabilidade de sucesso na identificação das fontes de poluição, nos quais o método demonstrou mais de 45% de melhoria no número de buscas bem-sucedidas em comparação com algoritmos tradicionais de busca probabilística.

Zhow (2024) *et al.* aprimoraram o uso do *Grey Wolf Optimizer* (GWO) no planejamento de rotas de VANTs, superando limitações como baixa convergência, suscetibilidade a ótimos locais e pouca robustez, por meio do modelo NI-GWO, que

demonstrou melhorar a função de avaliação de trajetórias, o fator de convergência e o método de atualização de posição, além de integrar o *Dynamic Window Approach* (DWA) para evitar obstáculos dinamicamente.

O contexto de aplicação da abordagem consistiu no planejamento cooperativo de rotas para VANTs em ambientes complexos influenciados por incertezas, especialmente voltado para cenários militares. Os autores partiram da necessidade de que drones, antes de entrarem em zonas de combate, consigam traçar trajetórias que minimizem riscos e sejam eficientes desde o ponto de decolagem até o alvo, evitando áreas de ameaça, zonas de voo proibido e obstáculos dinâmicos.

O cenário do estudo considerou ambientes tridimensionais discretizados, com obstáculos e restrições de altitude, inclinação e ângulo de manobra, zonas de exclusão aérea, como áreas densamente povoadas ou controladas militarmente. Além disso, considerou formações de voo em grupo, tais como em V, em linha e em diamante, simulando operações colaborativas de múltiplos VANTs. Por fim, considerou a necessidade de evitar colisões entre os próprios drones e de otimizar indicadores como distância percorrida, tempo de missão e consumo de energia.

Assim, o algoritmo NI-GWO, versão aprimorada do *Grey Wolf Optimizer*, integrada ao *Dynamic Window Approach*, foi aplicado para gerar rotas que equilibrassem segurança, eficiência energética e capacidade de desvio de obstáculos, em um contexto de operações cooperativas de VANTs em ambientes militares dinâmicos e restritivos.

Na conclusão, foi constatado que o algoritmo NI-GWO proposto foi capaz de superar as limitações dos métodos tradicionais de planejamento de rotas para VANTs, como baixa velocidade de convergência, risco de aprisionamento em ótimos locais e pouca robustez. Ao introduzir um fator de convergência não linear, atualizar dinamicamente as posições com base na aptidão dos “lobos” e integrar o algoritmo *Dynamic Window Approach* (DWA) para lidar com obstáculos móveis, o NI-GWO demonstrou desempenho superior em ambientes incertos e tridimensionais.

Nas simulações, o algoritmo alcançou melhores valores de aptidão, reduziu o comprimento médio das rotas, diminuiu o tempo de planejamento e apresentou menos colisões em comparação com PSO, ABC, GWO e MP-GWO. Além disso, mostrou maior capacidade de evitar obstáculos dinâmicos e de gerar trajetórias seguras e eficientes para operações cooperativas de múltiplos VANTs.

Plessen (2025) aborda o planejamento de rotas de VANTs para atender múltiplas áreas dentro de um contorno delimitado, evitando obstáculos e se mantendo dentro de um contorno,

aplicado em um contexto voltado para a pulverização agrícola localizada, em que o contorno representa o campo e os blocos representam áreas de ervas daninhas a serem tratadas, enquanto obstáculos incluem lagoas ou ilhas de árvores. O método proposto combinou uma solução heurística do problema do caixeiro-viajante (TSP) com técnicas de cobertura otimizada de áreas, avaliando diferentes heurísticas de inicialização e refinamento do TSP, além de métodos de cobertura em experimentos reais.

Nessa pesquisa, o cenário compreendeu campo delimitado por um contorno fechado, que representa a borda da lavoura, dentro do qual existem múltiplas manchas de ervas daninhas ou áreas danificadas que precisam ser pulverizadas. Além disso, foi considerada a existência de obstáculos internos, como lagoas ou ilhas de árvores, que devem ser evitados para garantir a segurança do voo. O VANT deve percorrer todas as manchas, cobrindo cada uma delas sem deixar lacunas, e ao mesmo tempo minimizar o comprimento total da trajetória.

Para isso, o problema foi dividido em duas partes, um consistindo em subproblema de roteamento entre manchas, tratado como uma versão heurística do problema do caixeiro-viajante (TSP), e o outro como subproblema de cobertura de área dentro de cada mancha, que inclui o uso de caminhos de cabeceira (*headland paths*) para evitar falhas de cobertura.

Assim, a abordagem foi aplicada em experimentos reais com campos contendo diferentes números de manchas (15, 19 e até 197 manchas de ervas daninhas), sempre dentro do contexto de planejamento eficiente de rotas de drones agrícolas para pulverização localizada, garantindo cobertura completa e evitando obstáculos. Ao final, foi verificado que a combinação das heurísticas de solução para o PCV com métodos otimizados de cobertura de áreas que incluem caminhos de cabeceira mostrou-se eficaz para o planejamento de rotas de VANTs em pulverização localizada agrícola.

Os resultados dos experimentos, realizados com diferentes escalas (15, 19 e até 197) evidenciaram que a heurística de refinamento H4, que incentiva trajetórias sem cruzamentos, foi particularmente adequada para melhorar a solução do TSP, gerando rotas mais eficientes e a contribuição das trajetórias de cobertura dentro das manchas foi maior do que o esperado no comprimento total da rota, o que destacou a importância de otimizar não apenas o percurso entre áreas, mas também a lógica de cobertura interna de cada mancha.

Zuo *et al.* (2023) propuseram framework *SINR Aware Predictive Planning* (SAPP), que utiliza redes 4G/5G em ambiente simulado para planejar trajetórias de UAS, buscando minimizar a distância de voo e garantir qualidade mínima do enlace de comunicação C2, que se dá entre os VANTs e as estações rádio base (ERB), enfrentando o desafio da variação

temporal da relação *sinhal interferência adicionada de ruído* (SINR) causada pela interferência entre os VANTs.

Os pesquisadores definiram o contexto de aplicação da abordagem para o planejamento de trajetórias de sistemas aéreos não tripulados (SANT/VANTs) em ambientes de tráfego aéreo controlado, utilizando redes 4G/5G como infraestrutura de comunicação. O objetivo era garantir que os drones mantivessem um link de comando e controle (C2) confiável, medido pela qualidade do sinal em termos de SINR (*Signal-to-Interference-plus-Noise Ratio*).

As trajetórias dos VANTs não apenas determinam o custo energético e a distância percorrida, mas também influenciam a qualidade da comunicação deles e de outros VANTs próximos, devido à interferência de radiofrequência gerada entre estações base e os transmissores das aeronaves. O estudo considerou um ambiente simulado com múltiplas estações base LTE/5G, tráfego de diferentes intensidades e restrições de segurança, como evitar colisões e manter separação mínima entre aeronaves.

Assim, foi desenvolvido o framework SAPP (SINR Aware Predictive Planning), que combina modelos de previsão de SINR (treinados com dados de simulação) com uma versão modificada do algoritmo A* (CommA*), incorporando custos e restrições de comunicação ao planejamento de rotas. Os pesquisadores concluíram que o *framework* SAPP (*SINR Aware Predictive Planning*) e o algoritmo CommA* proposto foram capazes de superar as limitações dos métodos tradicionais de planejamento de trajetória de VANTs, que normalmente não consideram a qualidade da comunicação.

Os resultados mostraram que o modelo de previsão de SINR desenvolvido foi altamente preciso, apresentando correlação próxima de 0,98–0,99 em relação às simulações e permitiu integrar métricas de comunicação ao planejamento de rotas. Com isso, o CommA* conseguiu gerar trajetórias que evitam colisão, menor distância de voo e, ao mesmo tempo, uma melhoria média superior a 3 dB na qualidade do link de comunicação em comparação ao A* convencional.

Nota-se, contudo, que são reduzidas as pesquisas que se aproximam do contexto apresentado neste estudo, pois, em geral, são propostos algoritmos para otimização em atividades de transporte ou missões entre dois pontos, quais sejam, o ponto de partida e o ponto de destino distintos, ou seja, não se constituindo por um ciclo hamiltoniano. Além disso, a maior parte das missões não considera a execução de tarefas ao longo do deslocamento, mas a execução de uma trajetória que considera obstáculos, estáticos ou dinâmicos em alguns casos, com a conclusão ou execução da tarefa no destino.

A Tabela 1 sintetiza os achados nos trabalhos apresentados.

Tabela 1 – Síntese dos trabalhos relacionados mais relevantes

Autor(es)	Problema Pesquisado	Proposta / Resultados
Hindumathi et al. (2025)	Eficiência no planejamento de rotas (bateria, distância e tempo).	Comparação entre Dijkstra, A*, RRT e RRT*, cujos resultados demonstraram que Dijkstra garante o caminho mais curto; A* melhora o desempenho com heurísticas; RRT* simplifica trajetos complexos (mapa hipotético)
Deng et al. (2024)	Logística urbana de carga com necessidade de comunicação confiável com a base.	Algoritmo de Dijkstra aprimorado + Algoritmo Genético Híbrido (HGA), almejando minimização de energia e garantia de conexão estável (mapa de rádio) durante a coleta e entrega (mapa e estações hipotéticos)
Ahmad et al. (2024)	Planejamento em ambientes dinâmicos com vento e pistas de pouso móveis.	Algoritmo GW-A* (combinação de A* com Grey Wolf Optimizer), sendo demonstrado desempenho superior ao A* tradicional, oferecendo rotas mais eficientes e adaptabilidade ao vento. (mapa hipotético)
Ha (2024)	Deteção de poluição do ar em ambientes urbanos estocásticos.	Versão aprimorada do A* com pesos baseados na probabilidade do alvo, obtendo melhoria de mais de 45% no sucesso das buscas em comparação a métodos convencionais. (mapa hipotético)
Zhou et al. (2024)	Baixa convergência e falta de robustez em otimizadores tradicionais.	Modelo NI-GWO integrado ao Dynamic Window Approach (DWA), alcançando melhoria na convergência e capacidade de evitar obstáculos dinâmicos de forma robusta. (mapa hipotético)
Plessen (2025)	Pulverização agrícola em áreas com contornos delimitados e obstáculos (ilhas).	Heurística de PCV (TSP) combinada com técnicas de cobertura otimizada, alcançando definição de trajetórias eficientes que respeitam os limites do campo e evitam obstáculos internos. (percurso boustrophedon e outros)
Zuo et al. (2023)	Variação de sinal (SINR) e interferência C2 em redes 4G/5G.	Framework SAPP (SINR Aware Predictive Planning), obtendo minimização da distância de voo ao mesmo tempo em que garantiu a qualidade mínima do enlace de comunicação. (mapa hipotético)

Fonte: sintetizada pelo autor.

É oportuno destacar que as tarefas apresentadas nos trabalhos de Deng *et al.* (2024) e Plessen (2025) apresentam mais proximidade à tarefa aqui proposta, uma vez que o VANT deve executar trajetória que contemple vários nós para cumprimento da missão, buscando minimização de custos diversos, tal como o consumo de energia, e o trabalho do Zuo *et al.* (2023) apresenta considerações de radiofrequência dos enlaces C2 ao longo da trajetória planejada entre dois pontos de um grid, não se assemelhando ao problema do caixeiro viajante, aqui apresentado.

Trata-se de abordagem que visa manter o enlace de rádio em qualidade satisfatória, ou seja, acima de certo limiar mínimo do SINR, sem que existam tarefas de aproximação para monitoramento espectral identificação de sinais não autorizados. No estudo de Plessen (2025), a missão consiste em planejar uma trajetória de custo minimizado, sem, contudo, estabelecer missões intermediárias que se dissociem do problema principal ao longo do deslocamento, uma

vez que as missões intermediárias, aplicação do spray em um nicho, consiste em uma etapa adicional de otimização, pois o objetivo central permanece: reduzir o comprimento do voo necessário para essa finalidade.

3 METODOLOGIA

Este capítulo descreve os principais conceitos e fundamentos teóricos que embasaram a metodologia aplicada no presente estudo. Primeiramente é tratado conceitualmente o problema de otimização envolvido. Em seguida, são apresentados os aspectos envolvidos na propagação de sinais de radiofrequência bem como a definição de um contexto para teste da hipótese. Por fim, foram delineados e trabalhados os aspectos do simulador, considerado fatores inerentes ao ambiente de voo e à atividade que o sistema de monitoramento nele montado deverá desempenhar.

3.1 Modelamento do problema de otimização

Por sua natureza, o VANT é virtualmente livre para executar percursos em qualquer direção e sentido. Virtualmente porque podem existir regiões com obstáculos naturais ou artificiais ou, ainda, regiões proibidas ao voo de VANTs por questões de ordem pública ou riscos a aeronaves civis (Brasil, [2017?], p. 71). Deve-se considerar, porém, que um obstáculo não elimina a interligação entre dois nós em uma rede, mas aumenta a distância entre eles por exigir distorção na trajetória para contornar o obstáculo.

Neste sentido, considerando que virtualmente todos os nós ou vértices da rede possuem rotas aéreas possíveis de serem percorridas e que cada nó precisa ser visitado uma única vez, a rede pode ser percorrida em um ciclo hamiltoniano e compõe, por consequência, um grafo hamiltoniano (Santos, 2017, p. 596). Esse problema é amplamente conhecido por *problema do caixeiro viajante* (PCV). Importa ressaltar que, uma vez que percorridos quaisquer números de nós, o retorno ao ponto de partida sempre poderá ser percorrido em rota própria, sem revisitar necessariamente qualquer nó, como no trecho em vermelho do exemplo de Figura 1.

Figura 1 – Exemplo de trajetória não otimizada entre 8 sedes municipais no Maranhão



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Basicamente, o problema do caixeiro pode ser classificado como simétrico, assimétrico ou múltiplos caixeiros viajantes (Matai, Singh, Mittal, 2010), não se aplicando este último ao presente estudo. São parâmetros do PCV:

$$V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\} \quad (1)$$

$$T = \{(r, s): r, s \in V\} \quad (2)$$

$$v_n = (lat, lon), \quad (g_1 \leq lat \leq g_2; g_3 \leq lon \leq g_4) \quad (3)$$

onde V representa o conjunto de cidades ou estações, no presente caso; T , o conjunto de arestas e l_{rs} o custo, ou comprimento para o presente caso, para percorrer a aresta r, s que pertencem a T ; e g_1 a g_4 representam limites em grau decimal. Quando $l_{rs} = l_{sr}$, o problema é classificado como simétrico e assimétrico quando $l_{rs} \neq l_{sr}$ para pelo menos um par (r, s) . Para estações situadas no plano, o comprimento entre elas pode ser dado por distâncias euclidianas. Entretanto, para o presente caso, dadas as distâncias envolvidas na superfície esférica terrestre, os comprimentos são calculados pela fórmula de haversine.

Por exemplo, o nó localizado na ilha de São Luís representa o ponto de partida e retorno. Diante desse contexto, se deseja minimizar, inicialmente, o comprimento da trajetória a ser realizada pelo VANT ao longo de um conjunto estações (nós) de radiodifusão que estação instaladas em municípios diversificados. Esta etapa compreende o planejamento global de trajetória e é calculada com base nas coordenadas geográficas de localização de instalação das estações.

Seguindo o modelo para o problema de programação linear inteira proposto por Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954), “uma das mais citadas formulações matemáticas para o PCV” segundo Matai *et al.* (2010, tradução nossa), representa-se o modelo básico para o modelo do PCV simétrico:

$$\text{minimizar} \quad \sum_{i \neq j} l_{ij} * x_{ij} \quad (4)$$

satisfazendo:

$$\sum_{i < k} x_{ik} + \sum_{j > k} x_{kj} = 2, \quad (k \in V) \quad (5)$$

$$\sum_{i, j \in Q} x_{ij} \leq |Q| - 1, \quad (Q \subset V, 3 \leq |Q| \leq n - 3) \quad (6)$$

$$x_{ij} = 0 \text{ ou } 1, \quad [(i, j) \in T] \quad (7)$$

em que:

- a) $l_{i,j}$ é o custo ou distância entre as estações i e j ;

- b) x_{ij} é a variável binária associada ao custo l_{ij} ;
- c) Q é um subconjunto de estações de V ; e
- d) V_n é representada pelo par coordenado (lat, lon) , ou seja, latitude e longitude.

A equação em (4) representa o comprimento da trajetória a ser minimizada considerando a ordem das estações definidas pelo produto entre os elementos da matriz de custo e a variável de controle, tendo como referência a posição de instalação de cada uma delas, ou seja, o local da torre. Porém, como deve-se presumir, o VANT não poderá se aproximar da estação por duas razões: *i)* risco de colisão com a estrutura; e *ii)* saturação do sensor instalado no VANT.

Assim, duas abordagens podem ser empregadas: *i)* a partir do modelamento básico acima descrito, a matriz de custo é calculada a partir de pontos previamente elegíveis no entorno de cada estação; ou *ii)* refina-se a solução inicial por meio de heurísticas. No primeiro caso, cada nó, que representa uma estação, passa a ser representado por um conjunto de nós em seu entorno, entre os quais um será definido como alvo a ser visitado pelo VANT, implicando em espaço de busca exponencialmente crescente com o número de pontos elegíveis a alvo no entorno de cada estação.

No segundo caso, emprega-se uma heurística que desloque cada coordenada de cada estação v_n em V para novas coordenadas v_n' resultando em novo conjunto V' de nós alvo para o VANT. Os pontos elegíveis são determinados a partir de critérios de radiofrequência, que podem ser definidos a partir de níveis de potência de radiofrequência S medidos em determinado ponto do voo ou a partir de critério que envolva a relação entre S e um determinado piso de ruído N .

Embora exista uma vasta gama de algoritmos exatos, heurísticas e meta-heurísticas para a solução do PCV simétrico para um número significativo de nós, tais como método *branch and bound*, Dantzig, Fulkerson e Johnson. (1954), Held-Karp (1962), Miliotis (1976), Arora (1998), *vizinho mais próximo*, *inserção do nó mais próximo*, *2-opt*, *3-opt*, *busca tabu*, *simulated annealing*, *algoritmo genético*, este trabalho não pretende explorar a performance desses algoritmos no contexto proposto.

Entretanto, com o fito de apresentar cenários de trajetórias variados, os algoritmos de *busca exaustiva* e do *vizinho mais próximo* foram empregados na geração da sequência inicial, que sofreu refinamento local por meio de uma segunda heurística no sentido de proporcionar baixo esforço computacional, quando será considerada a restrição relacionada ao monitoramento espectral, conforme demonstrado a seguir. Além disso, o problema de

otimização também foi modelado na suíte de otimização Gekko, de Beal *et al.* (2018), em ambiente Python e resolvido pelo *solver* APOPT (Hedengren *et al.*, 2012).

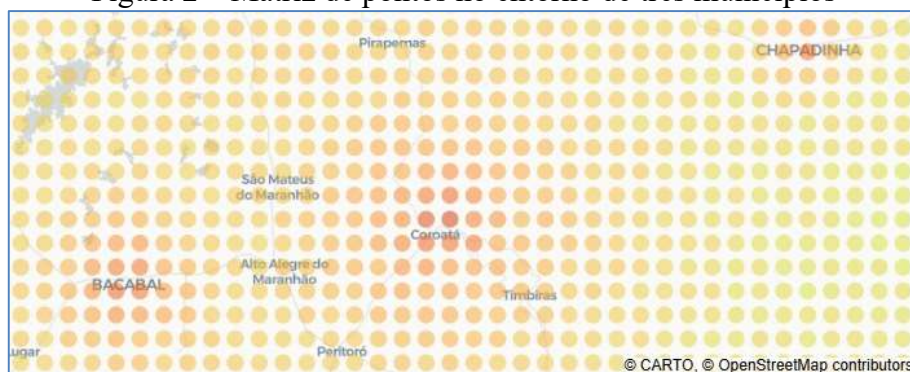
3.2 Refinamento da solução inicial por escalada

A implementação da etapa precedente por qualquer dos algoritmos anteriormente mencionados, que receba como entrada as coordenadas geográficas das estações em V e a matriz de arestas T , tem por função a geração de uma sequência de estações (nós) a serem visitadas uma única vez, partindo e retornando a um ponto comum (base). Entretanto, considerando o contexto de aplicação do simulador, deve-se considerar que o VANT:

- a) não poderá haver colisão com a torre ou outros obstáculos; e
- b) o sensor instalado no VANT não deve ser exposto a sinais de potência excessiva, sob risco de provocar a saturação da etapa de entrada e a distorção das leituras.

Neste sentido, busca-se identificar um ponto afastado da estação, em uma nuvem de pontos em seu entorno, conforme ilustrado na Figura 2, que respeite essas restrições, proporcione a leitura adequada e economia no percurso. Nessa figura, os nós centrais estão centrados nas sedes municipais (vermelho) e vão variando em direção ao amarelo, perpassando tons de laranja, à medida que certa grandeza varia. Nesse caso, somente os pontos que respeitam certo limiar são elegíveis.

Figura 2 – Matriz de pontos no entorno de três municípios



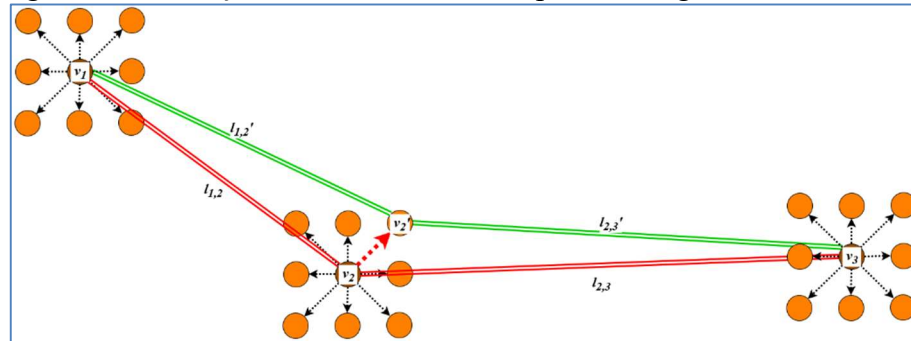
Fonte: produzido pelo autor (2025)

Hernardo, Mendiburu e Lozano (2018, tradução nossa) sustentam que:

Algoritmos baseados em busca local são métodos eficientes usados para resolver problemas complexos de Otimização Combinatória. Especificamente, os algoritmos de escalada de colina [*hill climbing*], que são amplamente utilizados na literatura. Partindo de uma solução inicial e considerando uma vizinhança específica, essas técnicas sempre se movem de soluções vizinhas piores para melhores, até que um ótimo local seja alcançado.

A Figura 3 exemplifica um movimento realizado para um ponto adjacente v_2' no entorno de um ponto inicial v_2 , que representa uma redução no custo $l_{1,2} + l_{2,3}$ para $l_{1,2}' + l_{2,3}'$.

Figura 3 – Ilustração de um movimento a partir do algoritmo de escalada



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Borghoff, Knudsen e Matusiewicz (2011, p. 58, tradução nossa) descreveram o algoritmo como:

Algoritmos de subida de colinas são uma classe geral de algoritmos de otimização heurística que lidam com o seguinte problema de otimização. Existe um conjunto finito X de configurações possíveis. Cada configuração recebe um número real não negativo chamado custo, ou, em outras palavras, uma função de custo é definida como $f: X \rightarrow \mathbb{R}$. Para cada configuração $x \in X$ um conjunto de vizinhos $\eta(x) \subset X$ é definido. O objetivo da busca é encontrar $x_{min} \in X$ minimizando a função de custo $f(x)$, $f(x_{min}) = \min \{f(x) : x \in X\}$, movendo-se de vizinho para vizinho dependendo da diferença de custo entre as configurações vizinhas.

O algoritmo visita cada estação realizando os movimentos possíveis obedecendo às restrições supramencionadas. Por exemplo, em relação à estação v_2 , o algoritmo verifica qual movimento em relação aos nós adjacentes, no seu entorno, resulta em minimização do custo, permanecendo estático em caso contrário. O algoritmo termina quando não há mais movimentos em todos os nós que resultem em redução do comprimento total do percurso. A sequência final contendo os novos conjuntos de vértices V' e de arestas T' são entregues ao simulador para a execução da trajetória do VANT.

Um exemplo de pseudocódigo para a busca local em escalada com fundamento na minimização local do comprimento (custo), tendo em vista a aplicação de restrições genéricas para validação de cada movimento, se encontra ilustrado no Algoritmo 1.

Algoritmo 1 – Pseudocódigo em escalada com restrições genéricas

Algoritmo 1: Pseudocódigo de escalada

Entrada: grafo não direcionado, coordenadas iniciais dos n nós, base e restrições;

início:

copie o nó *base* em V na posição 0 e $n+1$;

$V' \leftarrow V$

$i \leftarrow \{\leftarrow, \nearrow, \uparrow, \rightarrow, \searrow, \downarrow, \swarrow\}$;

faça:

$\text{comprimento}(V) \leftarrow \text{comprimento}(V')$:

faça para $n > 0$ **até** n :

para cada i :

se $[\text{custo}(n-1, n+i, n+1) < \text{custo}(n-1, n, n+1)] \wedge [\text{restrições}(n+i) = \text{Verdadeiro}]$:

$n \leftarrow n + i$;

$\text{atualiza}(V')$;

fim.

fim.

fim.

enquanto $\text{comprimento}(V') < \text{comprimento}(V)$:

retorne V' .

fim.

Fonte: produzido pelo autor (2025)

Por exemplo, se o nível de potência ou a intensidade de campo elétrico for suficiente para o propósito do monitoramento, adiciona-se a restrição conforme em (8):

$$r_{min} \leq S_{v'_n} \leq r_{máx}, \quad v'_n = (lat_n, lon_n) \quad (8)$$

em que $S_{v'_n}$ é o nível de potência ou a intensidade de campo calculado na coordenada da estação v deslocada no espaço de busca e definida por v' , e $\{r_{min}, r_{max}\}$ são limiares (*threshold*) previamente definidos em relação à mesma grandeza selecionada para a medição. Por outro lado, pode-se especificar a elegibilidade de um determinado ponto a partir da relação *signal-to-noise ratio* (SNR), relação sinal-ruído, que representa a relação mais simples entre a potência do sinal recebido em relação à potência do ruído na entrada do receptor e é matematicamente expresso por (Beasley, Miller, 2005, p. 18):

$$\frac{S}{N} = \frac{\text{signal power}}{\text{noise power}} = \frac{P_S}{P_N} \quad (9)$$

Em telecomunicações é usualmente expressa em dB por meio da seguinte relação:

$$\frac{S}{N} = 10 \log \left(\frac{P_S}{P_N} \right) \quad (10)$$

Assim, nesse caso, se adiciona a restrição à etapa de refinamento conforme representação genérica em (11), em que $\{t_{min}, t_{max}\}$ representam limiares de restrição que garantem a seleção de um ponto útil ao propósito do monitoramento.

$$t_{min} \leq \frac{P_{s'_v}}{P_n} \leq t_{max} \quad (11)$$

A estimativa da potência do sinal em um ponto específico do mapa será realizada com base nas considerações apresentadas nas subseções seguintes.

3.3 O solver APOPT

Como alternativa ao algoritmo de escalada não somente para a etapa de refinamento, mas para a geração da sequência inicial, foi selecionado o *solver* APOPT (*Advanced Process OPTimizer*) que se destaca por sua capacidade de lidar com problemas de programação linear, não linear e inteira mista, sendo amplamente utilizado em aplicações industriais e científicas (Hedengren *et al.*, 2012).

A finalidade principal do APOPT é fornecer soluções otimizadas para modelos matemáticos que descrevem processos industriais e científicos. Entre os tipos de problemas que podem ser tratados pelo solver, destacam-se a programação linear (LP), a programação quadrática (QP), a programação não linear (NLP) e a programação inteira mista (MIP, MILP, MINLP).

Essa abrangência permite que o APOPT seja utilizado em diferentes cenários, desde o planejamento de trajetórias de veículos aéreos não tripulados até a otimização de processos químicos e energéticos. O objetivo central é reduzir custos, aumentar a eficiência e garantir maior confiabilidade operacional, traduzindo modelos complexos em soluções práticas e aplicáveis.

No presente estudo, embora o conjunto de valores possíveis seja finito, a combinação entre variáveis gera uma explosão combinatória, tornando inviável a avaliação exaustiva de todas as alternativas para um significativo número de instâncias. Nesse contexto, a metodologia apresentada pela APMonitor enfatiza o uso de técnicas como o *branch and bound*, que exploram sistematicamente o espaço de soluções, descartando regiões inviáveis ou subótimas e concentrando o esforço computacional nas áreas mais promissoras.

O *solver* APOPT desempenha papel central nessa metodologia, sendo o responsável por garantir que as variáveis discretas ou inteiras sejam respeitadas durante o processo de otimização. No ambiente GEKKO (Python), após selecionar o APOPT como *solver*, a definição de variáveis inteiras é estabelecida de forma simplificada a partir da opção *integer = True*, facilitando a modelagem e a integração em projetos de pesquisa e desenvolvimento, tornando o solver adequado para problemas de decisão binária, como no caso.

3.4 Propagação dos sinais de radiofrequência

A propagação de sinais de radiofrequência está sujeita a fenômenos naturais que causam, por vezes, seu enfraquecimento (atenuação) ou alcance superior ao horizonte visual de um observador. Além de outros, alguns desses fenômenos se manifestam por meio de reflexões, refrações e difrações, conforme explanação abaixo:

Existem a onda direta e a onda refletida pelo solo. [...]. A onda direta é, de longe, o modo de comunicação por antena mais utilizado. A onda propagada é direta da antena transmissora para a receptora e não viaja ao longo do solo. Portanto, a superfície da Terra não a atenua. A onda espacial direta tem uma limitação severa — ela é basicamente limitada às chamadas distâncias de transmissão em linha-de-visada. Assim, a altura da antena e a curvatura da Terra são os fatores limitantes. O horizonte de rádio real é cerca de 100 km maior que a linha de visão geométrica devido aos efeitos de difração [...]. Os efeitos de difração causam a leve curvatura da onda, [...]. Se a antena transmissora estiver a 300 metros acima do nível do solo e a antena receptora estiver a 6 metros de altura, resulta um horizonte de rádio de cerca de 80 km. Isso explica a cobertura que as estações típicas de rádio FM e TV oferecem, pois utilizam a propagação direta por ondas espaciais. (Beasley, Miller, 2005, p. 618, tradução nossa)

No contexto da presente pesquisa, considerando a terra como esfera perfeita para simplificação do modelo, o centro de fase das antenas transmissoras estará instalado a uma altura h acima da base da torre (HCI), estando ao nível do mar. Por outro lado, o VANT estará localizado a 30 metros acima do nível do mar a cada ponto do deslocamento sem obstruções entre este e as antenas transmissoras. Dessa forma, considerando que a faixa de radiofrequência em análise se situa na faixa de VHF, calcula-se o limite do horizonte de rádio a partir de (12):

$$d \approx 4,12 \times (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2}) \quad (12)$$

O horizonte de rádio representa, portanto, a distância máxima permissível entre a estação transmissora de FM e o sensor montado no VANT para haver detecção e início da medição dos sinais por este sem considerações de outros fenômenos. Ou seja, deve ser assumido que em distâncias maiores que o horizonte de rádio o sensor não captará sinais emitidos por uma determinada estação de FM ou de outro serviço de telecomunicação.

Ainda, à medida que os sinais se propagam, a energia inicialmente irradiada é dispersada no espaço e essa dispersão, do ponto de vista ideal, para uma antena isotrópica, resulta em densidade de energia em um determinado ponto do espaço que varia inversamente com o quadrado da distância, conforme explica Beasley e Miller (2005, p. 613, tradução nossa):

Se uma onda eletromagnética fosse irradiada igualmente em todas as direções a partir de uma fonte pontual no espaço livre, resultaria uma frente de onda esférica. Tal fonte é denominada fonte pontual isotrópica. [...]. Uma fonte isotrópica irradia igualmente em todas as direções. [...]. A densidade de potência (em watts por metro quadrado) [...] é inversamente proporcional ao quadrado da distância, r (em metros), da fonte, em relação à potência originalmente transmitida, P .

Assim, em (13), há que:

$$\wp = \frac{P_t}{4\pi r^2} \quad (13)$$

onde $\wp$ é a densidade de potência em W/m², r é a distância de um ponto no espaço em relação à fonte originária da potência P_t .

Entretanto, a propagação ao longo do espaço real sofre atenuação adicional causada pela vegetação, habitações, umidade, obstáculos de grandes dimensões entre o transmissor e receptor, entre outros aspectos (Akanni, Oliseloke, 2020). No sentido de prever níveis de potência em determinados pontos de uma região a partir da potência transmitida por uma estação de telecomunicação, vários modelos de propagação foram propostos e têm como característica comum a propriedade de prever a atenuação de potência sofrida pela energia propagada, e consideram fenômenos que afetam a propagação em diversos contextos.

A Tabela 2 apresenta a síntese de modelos de propagação amplamente empregados em projetos de telecomunicações e suas características:

Tabela 2 – Modelos de perdas de propagação

Modelo	Aplicação	Faixa de frequência	Distância útil
Free space model	Ambiente sem obstáculos; linha de visada entre transmissor e receptor; desconsidera efeitos de refração, difração, dispersão	ND	ND
ITU-R P.525-5	Modelo de cálculo de perda em espaço livre conforme modelo anterior.	30-20.000 MHz	ND
Okumura-Hata	Modelo Hata para serviço celular em regiões urbanas	150-1.500 MHz	1-20 km
COST231-Hata	Áreas urbanas; extensão de frequência do modelo Hata para regiões urbanas	150-2.000 MHz	1-20 km
Egli	Aplicação geral para a faixa de VHF/UHF considerando altura média de obstáculos de 30 m.	30-1.000 MHz	<40 km
Longley Rice	Modelo empregado pela FCC	20-20.000 MHz	1-2000 km

Fonte: sintetizada pelo autor a partir de Rappaport (2011) e ITU (2024).

Por exemplo, o modelo de perda de propagação em espaço livre (*free space model*) se apresenta como modelo básico que considera, segundo a *International Electrotechnical Commission* - IEC, a propagação de sinais eletromagnéticos entre estações sem obstruções, em meio dielétrico ideal homogêneo que pode ser considerado de extensão infinita em todas as direções⁵.

Os modelos são passíveis de aperfeiçoamento de acordo com condições do experimento. Por exemplo, o modelo de propagação em espaço livre apresenta a forma apresentada em (14) a partir de considerações das áreas efetivas das antenas de transmissão e recepção, que se traduzem em seus ganhos (Rappaport, 2011, p. 72):

⁵ Disponível em: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=705-02-27>. Acesso em: 12 ago. 2025.

$$PL(\text{dB}) = -10 \log \left[\frac{G_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^2 d^2 L} \right] \quad (14)$$

em que PL é a perda (atenuação) em dB entre antenas as antenas de transmissão e recepção, G_t e G_r são os ganhos absolutos das antenas de transmissão e recepção respectivamente, d é a distância entre as antenas em metros limitada à linha de visada, λ é o comprimento de onda da frequência do sinal monitorado em metros, e L representa as perdas do sistema. Assim, a potência recebida no sensor é calculada em (15).

$$P_r(\text{dBm}) = P_t(\text{dBm}) + PL(\text{dB}) \quad (15)$$

Entretanto, em telecomunicações o ruído é elemento inerente ao meio e aos sistemas eletrônicos. Seu estudo é complexo e foge ao escopo do presente estudo. Por exemplo, Theodore Rappaport (2011, p. 565) esclarece que:

[...] a capacidade de estimar a SNR é importante para determinar as potências de transmissão ou os níveis de sinal recebido adequados em diversas condições de propagação. O nível de sinal em uma antena receptora pode ser calculado com base nas equações de perda de percurso [...]. No entanto, para calcular o nível de ruído na entrada de um receptor, é necessário conhecer os ganhos (ou perdas) de cada estágio do receptor, bem como a temperatura ambiente de ruído na antena receptora. Todos os componentes eletrônicos geram ruído térmico e, portanto, contribuem para o nível de ruído observado na saída do detector de um receptor.

Assim, por simplificação, assume-se como referência um nível mínimo de potência de ruído fixado em patamar habitualmente encontrado em instrumentos reais para fins de estimativa dos valores de SNR em cada ponto do mapa.

3.5 Simulador

O simulador proposto será aplicado ao monitoramento de estações de radiodifusão ou telecomunicações por meio de um veículo aéreo não-tripulado (VANT) de asa fixa, coletando dados de relacionados à potência de sinal em uma faixa de frequência ao passo em que realizará o monitoramento de um conjunto predefinido de estações, que determinará sua rota a partir dos algoritmos de roteamento e refinamento anteriormente comentados.

Cada estação autorizada deve ser monitorada adequadamente. Por *adequadamente* deve ser entendido que o VANT deve se aproximar de uma estação até um ponto em que os sinais lidos atendam a um critério específico baseado em nível de sinal ou relação sinal-ruído. Além disso, áreas proibidas, como aeroportos, e obstáculos físicos, tais como torres e linhas de transmissão, devem ser evitados. Para isso, modelos de forças de atração e repulsão entre corpos foram implementados a partir de funções variadas e de acordo com cada finalidade durante o voo.

O resultado da simulação se constituirá por um conjunto de coordenadas geográficas que podem, por exemplo, ser carregadas em um VANT como sugestão de trajetória prevendo os desvios necessários, sem prejuízo do auxílio complementar de sistemas de supervisão e segurança de voo embarcados no veículo.

3.5.1 Mecanismo da força-atrativa

Dada uma rota previamente planejada, a simulação do movimento do VANT é baseada na interação de forças de campo em corpos. Essas forças podem ser baseadas em funções que variam com o inverso do quadrado, como entre cargas elétricas, ou funções de base radial para repulsão, por exemplo. Estratégia semelhante, baseada em campos vetoriais, é encontrada no processo de guiamento de robôs estudado por Lu *et al.* (2024).

No presente contexto, o VANT apresenta uma dada velocidade vetorial de partida $\vec{v}$, a partir da qual é submetido à força-motriz resultante, simulada por analogia de cargas elétrica atrativa situada na coordenada obtida na etapa de refinamento. Essa força é calculada a partir de (16):

$$|\vec{F}| = k_0 Q_1 Q_2 / d^2 \quad (16)$$

onde $|\vec{F}|$ representa o módulo da força, k_0 é a constante de proporcionalidade dielétrica do vácuo, Q_n é o análogo à carga elétrica em cada corpo eletrostaticamente carregado, e d representa a distância entre esses corpos, calculada por meio da fórmula de haversine. No presente estudo, assumimos os valores de Q_n unitários e a constante k_0 um coeficiente positivo e não-nulo de atração. Ocorre que um efeito dessa analogia consiste na aceleração do corpo, dada pelo princípio fundamental da dinâmica, conforme (17):

$$\vec{a}_n = m^{-1} * \vec{F}_n \quad (17)$$

que resulta na velocidade u instantânea dada por EQQ:

$$\vec{u}_n = \vec{u}_{n-1} + \vec{a}_n * \Delta t \quad (18)$$

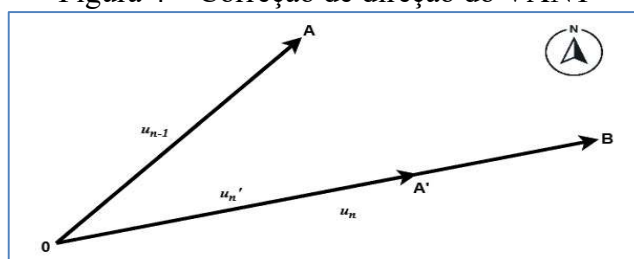
Em cumprimento à rota sequencial a ser visitada, cada nó representa o papel de uma carga elétrica unitária que atrai o VANT para sua localização a partir da força nele calculada, que também exerce o papel de carga unitária. Ocorre que a aceleração resultante da sujeição do VANT à força atrativa de campo resultaria em aceleração crescente do VANT, uma vez que o módulo da força $\vec{F}$ aumenta com a aproximação ao alvo, levando o sistema à instabilidade.

Em virtude disso, verifica-se que o fenômeno da aceleração não é relevante para o problema. Entretanto, no sentido de contornar esse efeito, o módulo da velocidade instantânea

do VANT, calculado a cada passo resultante do deslocamento causado pela força atrativa, é normalizada ao valor do módulo da partida. Assim, é aproveitado somente o efeito da mudança de direção causada pela resultante da força atrativa, dispensando-se o fenômeno da aceleração.

Neste sentido, normaliza-se a velocidade calculada tal que $\|\vec{u}'_n\| = \|\vec{u}_{n-1}\|$ mantendo a direção e sentido de $\|\vec{u}_{n-1}\|$. A Figura 4 ilustra o efeito da normalização do vetor resultante e a correção da direção do VANT.

Figura 4 – Correção de direção do VANT



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Do ponto de vista da implementação, calcula-se o vetor $\vec{OB}$, resultante da atração entre o VANT e o próximo nó a ser visitado por meio das equações (16), (17) e (18), e se normaliza seu comprimento conforme supra comentado, produzindo o novo vetor de velocidade $\vec{OA'}$.

O modelo de força motriz aqui apresentado não limita o emprego de outros modelos, tais como o inverso da distância, a derivada da função logística, entre outros que podem ser experimentados, tendo como variável independente a distância entre o VANT e o próximo nó a ser visitado. Entretanto, deve-se ter em mente que cada modelo precisará de ajustes nos hiperparâmetros correspondentes no sentido de promover equilíbrio entre as forças atrativas e repulsivas na etapa de simulação.

3.5.2 Mecanismo da força repulsiva horizontal

No sentido de promover o desvio de obstáculos, foi implementado o modelo de força repulsiva tanto para obstáculos que devem ser contornados, como torres empregadas nos serviços de telecomunicações, morros e região do aeroporto de São Luís, por exemplo. Trata-se da realização de desvios no plano horizontal de voo. Por exemplo, a Portaria DECEA nº 928/DNOR8, de 15 de maio de 2023, estabelece que:

6.2.1.4 Condicionantes operacionais específicas:

[...]

b) Para operações cuja Altura de Voo Solicitada esteja entre 100 ft, exclusive, e 200 ft, inclusive (aproximadamente 30 a 60 metros), e velocidade igual ou inferior a 60 Kt (aproximadamente 120 km/h):

- Manter-se afastado, no mínimo, 4480 metros das cabeceiras da(s) pista(s)

de aeródromos cadastrados, quando operando na ZAD;

Observa-se, portanto, o mandamento normativo no sentido de providenciar mecanismo que promova o desvio do VANT em, aproximadamente, 4500 metros em relação às cabeceiras das pistas dos aeródromos. Neste sentido, a força repulsiva a ser percebida pelo VANT deve produzir efeitos na medida do necessário, não influenciando na trajetória do seu voo quando afastado além dos patamares mínimos estabelecidos, como no caso da Portaria citada.

A implementação de uma função do tipo base radial gaussiana proporciona desprezível influência em regiões de voo sem obstáculos e forte influência próximo a eles, de acordo com as ajuste dos hiperparâmetros em (19):

$$F_{\text{rep}} = \alpha * e^{-\frac{d^2}{2\beta^2}} \quad (19)$$

em que d é a distância entre o VANT e o ponto repulsivo em metros, α e β são parâmetros que modulam a força repulsiva aplicada, sendo este último responsável por “abrir” ou “fechar” a curva da função, modulando o raio da distância desejada de afastamento. Alternativamente, foi implementada a função de força repulsiva com base na derivada da função logística, como em (20).

$$F_{\text{rep}} = 10^{-3} * \frac{e^{-d*(a*(\alpha-\beta)+k)}}{(1 + e^{-d*(a*(\alpha-\beta)+k)})^2} \quad (20)$$

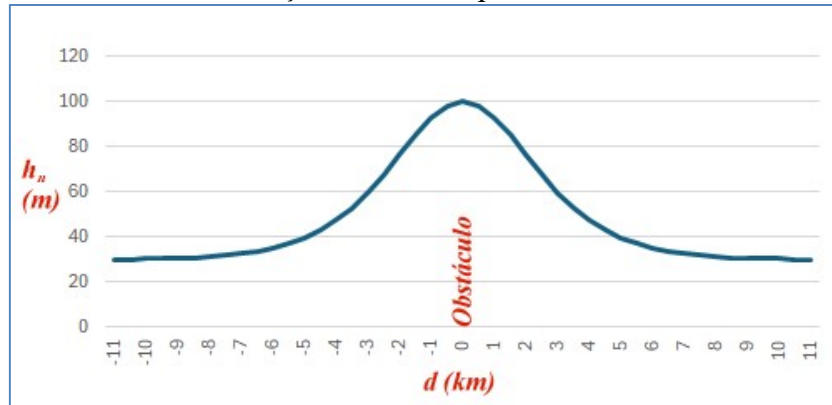
Nesse caso, d representa a distância máxima de aproximação do VANT em relação ao obstáculo em metros, que pode ser diferente para uma região proibida (aeroporto) e para uma torre de telecomunicações, por exemplo. Os parâmetros a , β e k são ajustados para mapear d na força repulsiva adequada ao afastamento.

3.5.3 Mecanismo da força repulsiva vertical

O desvio vertical de obstáculo se faz necessário quando o custo de contorno horizontal torna proibitiva essa alternativa. Por exemplo, linhas de transmissão são elementos distribuídos em centenas de quilômetros, conforme se observa na Figura 5, implicando na necessidade de desvio por meio de deslocamento vertical. Como efeito colateral, a variação de altitude ao longo do voo provocará, por exemplo, acréscimo no comprimento da trajetória.

O mapa apresenta um trecho da planta de linhas de transmissão oficial. As linhas de transmissão são modeladas no simulador a partir de suas coordenadas geográficas extremas, sendo calculada sua distância em relação ao VANT a cada deslocamento realizado por este. A

Figura 6 – Curva de variação de altitude para desvio vertical de obstáculo



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Na Figura 6, a origem do eixo das abcissas corresponde à localização do obstáculo que deverá ser transposto, reproduzindo a variação de altitude à medida que o VANT dele se aproxima, partindo de uma altitude de cruzeiro definida em 30 metros acima do solo.

3.5.4 Função de consumo de energia

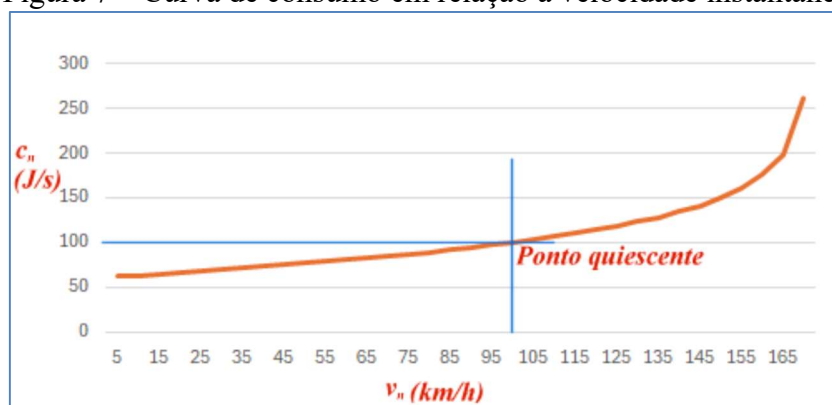
A reserva de energia, expressa em joules, foi estabelecida em virtude da indisponibilidade de informações concretas acerca do consumo energético de VANTs comerciais. Como prova de conceito e perante a ausência de dados reais, de forma arbitrária, foi estabelecido o ponto quiescente de consumo fixado em 100 (cem) joules/s em velocidade de cruzeiro, ou seja, 100 watts a 100 km/h.

Esses valores, embora arbitrários, servem para teste do modelo sem qualquer prejuízo de implementações posteriores que adote valores reais nesse quesito. Após ajustes de parâmetros, tendo como especificações os valores supra comentados, foi implementada a função de consumo na forma apresentada em (22).

$$c_n = \alpha * \ln\left(\frac{a + b * v_n}{p - b * v_n}\right) \quad (22)$$

onde c_n representa o consumo instantâneo, em J/s, no ponto n , e v_n representa a velocidade no mesmo ponto em km/h; $\alpha = 39,621885399$; $a = 1,6435352$; $b = 0,002080598$ e $p = 0,3564648$. O ponto quiescente do modelo está apresentado na curva da Figura 7. Cabe mencionar que Eom *et al.* (2018) e Zhan e Zeng (2020) estimaram a variação do consumo proporcional ao quadrado da velocidade instantânea, assim como nas curvas de consumo em Di Franco e Buttazzo (2015). Neste trabalho, a curva formada pela função logaritmo natural, modulada pelos referidos parâmetros, apresenta um comportamento adequado ao propósito, sem prejuízo da implementação de modelos reais multivariáveis.

Figura 7 – Curva de consumo em relação à velocidade instantânea



Fonte: produzido pelo autor (2025)

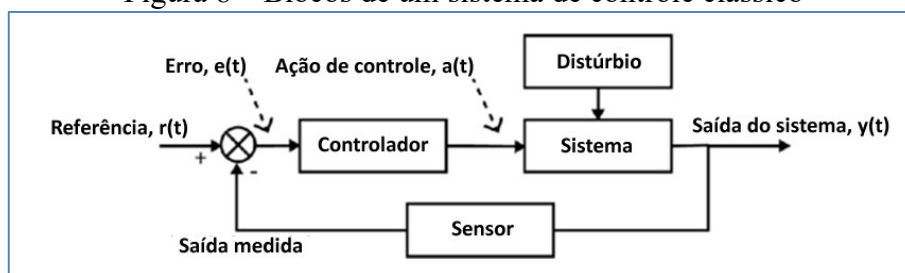
Considerando-se que se o VANT executar o percurso em velocidade constante, o consumo também será constante. Entretanto, com a finalidade de enriquecer o simulador, os efeitos do vento no consumo instantâneo não foram dispensados, uma vez que VANTs empregados em atividades profissionais possuem sistemas de controle de velocidade automático que atuam no sentido de compensar as influências externas na velocidade de direção do voo (Lu, Zhen, Hao, 2020).

Assim, desprezando os efeitos dinâmicos complexos que afetam o VANT e que não são contemplados no presente estudo, considera-se que a curva de consumo se comportará conforme indicado na Figura 7, servindo de base para o funcionamento do algoritmo de compensação dos efeitos do vento.

Um sistema de controle em malha fechada para velocidade pode ser descrito como aquele em que a velocidade desejada é continuamente comparada com a velocidade medida, gerando um erro que alimenta o controlador (Ogata, 2010). No contexto da presente pesquisa, esse controlador ajusta a potência ou o empuxo do motor de forma automática, compensando variações externas, como o vento.

Assim, o vento atua como um distúrbio no sistema, alterando a velocidade real do VANT. Contudo, graças ao laço de realimentação (sensor de velocidade), o controlador detecta essa diferença e corrige o comando de saída, mantendo a velocidade próxima ao valor de referência. Assim, o sistema garante estabilidade e robustez frente às perturbações ambientais, assegurando que o desempenho da missão não seja comprometido. A Figura 8 ilustra um sistema clássico de controle e já implementado em VANTs comerciais.

Figura 8 – Blocos de um sistema de controle clássico

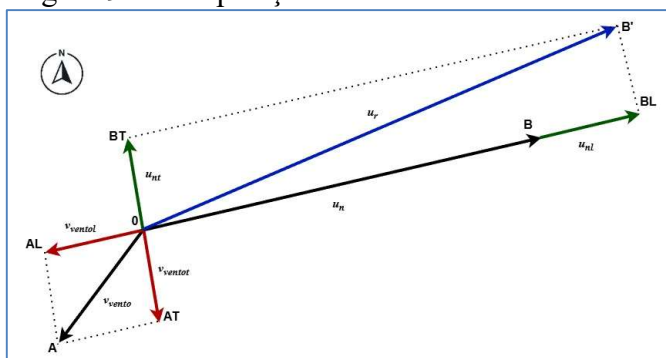


Fonte: adaptado pelo autor a partir de Ogata (2010)

Assim, do ponto de vista vetorial, o controle da velocidade e direção do VANT ao longo do voo, de forma simplificada, seus sistemas de propulsão e de controle de direção deverão lidar com as componentes transversais e longitudinais que atuam sobre as componentes de direção do VANT, conforme a ilustrado na Figura 9. Assume-se que o vento é definido pela intensidade constante da velocidade e direção como parâmetros de entrada.

A compensação produzida pelo VANT deve ser tal que resulte nas componentes reativas $\overrightarrow{BBL}$ e $\overrightarrow{OBT}$ em relação às componentes $\overrightarrow{OAL}$ e $\overrightarrow{OAT}$, respectivamente. A adição vetorial das componentes $\overrightarrow{OB}$, $\overrightarrow{BL}$ e $\overrightarrow{BT}$ resultarão na componente $\overrightarrow{OB'}$. O comprimento dessa componente deslocará o ponto de consumo no sentido tanto de aumento de consumo, deslocando o ponto quiescente para a direita sobre a curva de consumo, ou no sentido de redução de consumo, quando deslocará o ponto quiescente para a esquerda.

Figura 9 – Composição vetorial do efeito do vento.



Fonte: produzido pelo autor (2025)

A redução de consumo se dá quando a resultante o comprimento da resultante $\overrightarrow{OB'}$ é menor que o comprimento da resultante $\overrightarrow{OB}$, e isso tende a ocorrer quando a componente longitudinal do vento favorece o movimento do VANT, pois a componente reativa será no sentido de redução da propulsão, reduzindo o consumo, pois o ponto quiescente se desloca para a esquerda sobre a curva de consumo da Figura 7.

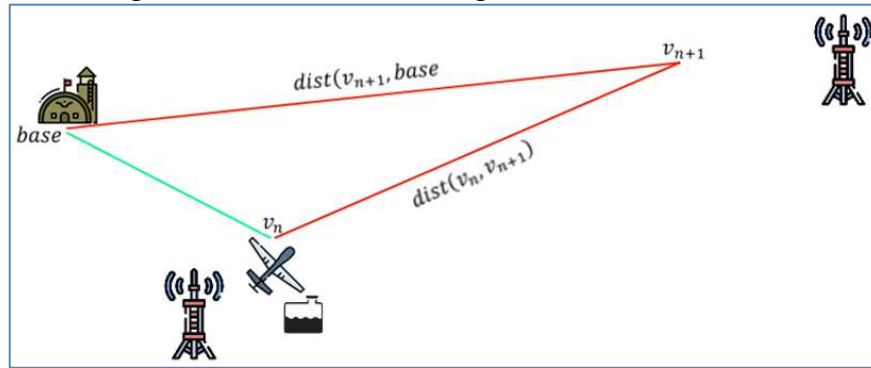
Por outro lado, deve-se ter em mente que, a partir de certo ponto, a componente transversal provocada pelo vento poderá exigir igual compensação transversal pelo VANT que,

quando combinada com a componente longitudinal, implique também em aumento de consumo, deslocando o ponto quiescente para a direita sobre a curva de consumo. Destaca-se que o módulo da velocidade do VANT permanecerá constante, conforme lançado a partir da base, entretanto, o ponto de consumo de energia variará conforme o esforço exigido para manter constante a velocidade.

3.5.5 Algoritmo de reabastecimento

Considerando que o problema lida com distâncias intermunicipais, foi prevista algoritmo de reabastecimento do VANT com avaliação e decisão ao longo da simulação (execução) da missão. A partir desse algoritmo, o VANT define se seguirá para o próximo nó, cuja coordenada geográfica já está pré-programada na memória do VANT ou se retornará à base. A Figura 10 ilustra a avaliação efetuada pelo algoritmo.

Figura 10 – Parâmetros do algoritmo reabastecimento



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Uma variável de decisão é disparada a partir das condições apresentadas em (23):

$$reabast = \begin{cases} 0, & dist(v_n, v_{n+1}) + dist(v_{n+1}, base) \leq autonomia_n \\ 1, & dist(v_n, v_{n+1}) + dist(v_{n+1}, base) \geq autonomia_n \end{cases} \quad (23)$$

em que *reabast* é a variável de decisão de reabastecimento; *dist()* é a função de cálculo da distância pela fórmula de haversine entre dois pontos na superfície; *autonomia_n* é calculada a partir do quantitativo de energia restante no ponto *n* em relação ao consumo médio no ponto de verificação, ou seja, quando o VANT alcança o ponto de fiscalização de uma estação, conforme apresentado em (24).

$$autonomia_n = \left(CapT - \sum_{i=0}^n c_i \right) * \left(\sum_{i=0}^n l_i \right) / \left(\sum_{i=0}^n c_i \right) \quad (24)$$

onde *autonomia_n* é a autonomia de voo em km; *CapT* é a capacidade nominal do tanque em joules; *c_i* é o consumo efetuado entre duas coordenadas geográficas em joules, sendo *c₀* = 1 joule; *l_i* é comprimento do trecho percorrido entre duas coordenadas geográficas em km, sendo

$l_0 = 0$. Deve-se observar que a autonomia mínima inicial do VANT deve ser suficiente para visitar o nós mais distante do conjunto e retornar à base.

3.5.6 Triangulação de estações não autorizadas

Conforme já comentado, uma das atividades a ser desempenhada pelo VANT é o registro do nível de sinal de determinada faixa ou canal de radiofrequência ao longo da trajetória do voo. A partir dos sinais registrados é possível estimar a direção de uma emissão desconhecida a partir do traço de um segmento de reta traçado perpendicularmente aos pontos de máximo do sinal monitorado.

Trata-se de modelo simplificado, uma vez que, em tese, é possível realizar a indicação de direção durante o voo por meio de sistemas de antenas especialmente projetadas para identificar a direção de emissões. Um exemplo dessa aplicação fazendo uso de um conjunto de 5 antenas montado em um VANT do tipo quadricóptero foi proposto por Willis *et al.* (2025).

No contexto deste estudo, a triangulação é atividade a ser executada no pós-processamento, a partir dos dados brutos de nível de sinal coletado. Considerando que os valores dos níveis de sinal serão registrados a cada coordenada geográfica registrada, na cadência de 1 coordenada por segundo (Salih *et al.*, 2013), os dados estarão intervalados de acordo com a velocidade selecionada para o voo.

A partir do volume de dados coletados, foi implementada janela deslizante de 5 pontos, que percorre o vetor de dados contendo nível, latitude e longitude, conforme Algoritmo 2.

Algoritmo 2 - Pseudocódigo de janela deslizante para identificação de máximos

Algoritmo 2: Pseudocódigo de janela deslizante

Entrada: vetor de dados de nível de sinal, coordenadas geográficas;

início:

$i = 2$

$k = 0$

$limExclusao = -60$ #Unidade em dBm, fixado a partir da observação do perfil dos sinais coletados

$Sig = \text{array}\{nível, lat, lon\}$

faça:

se $Sig[i-2][0] < Sig[i-1][0]$ **and** $Sig[i-1][0] < Sig[i][0]$ **and** $Sig[i+1][0] < Sig[i][0]$ **and** _

$Sig[i+2][0] < Sig[i+1][0]$ **and** $Sig[i][0] \geq limExclusao$:

$angPerpendicular = \text{calculePerpendicular}(Sig[i][1,2])$

$DF[k] = \text{definaCoordExtremosPerpendicular}(angPerpendicular)$

incremente k

incremente i

enquanto $i < \text{tamanho}(Sig) - 3$

desenheMapa(DF)

fim.

Fonte: produzido pelo autor (2025)

Deve-se observar que a escolha do tamanho da janela deslizante, tomando cinco pontos por vez ao longo do vetor de nível de sinais, se deu no sentido de aumentar a imunidade a repiques que podem ocorrer em função do ruído. Em verdade, quanto maior a janela, seguindo considerações dos parâmetros de variação de amplitude e ruídos presentes no próprio sinal ao longo da trajetória, bem como da frequência de atualização das leituras, maior a tendência de identificar picos isolados de emissões.

3.6 Monitoramento espectral no Brasil

Uma importante finalidade do monitoramento espectral, que é realizado por instrumentos analisadores de espectro (doravante sensor) fixos e portáteis, é assegurar o uso de faixas espectrais livres de interferências ou cujos níveis sejam aceitáveis de acordo com os requisitos técnicos vigentes e editados pela Anatel⁷. Como exemplo, cita-se a faixa de telemetria⁸ utilizada entre foguetes e estações terrenas e as faixas de radionavegação aeronáutica e radiocomunicação aeronáutica, que são utilizadas por aeronaves comerciais no cotidiano realizando transporte de cargas e passageiros ao longo do território nacional e, por isso, recebem especial atenção da citada agência reguladora⁹.

À vista disso, a Anatel dispõe do Plano de Monitoramento do Espectro relacionado às Aplicações Críticas (PM-EC)¹⁰, que abrange a proteção ao controle de tráfego aéreo e marítimo, em que são realizadas varreduras espectrais permanentes por estações fixas de monitoramento, ou rotineiras, por meio de instrumentos transportáveis e que são temporariamente instalados em sedes municipais quando da execução da atividade e em municípios que atendem aos critérios do plano com a finalidade de detectar e auxiliar a localização de emissões não autorizadas de sinais nessas faixas.

Para fins de desenvolvimento desta pesquisa, foi assumido o interesse em monitorar uma determinada frequência na faixa espectral destinada à radionavegação aeronáutica¹¹, situada entre 108-117,975 MHz no sentido de detectar a presença de sinais interferentes. Por

⁷ É possível observar requisitos nesse sentido na cláusula 5.1 do Ato nº 8104, de 10 de junho de 2022 editado pela Anatel. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2022/1687-ato-8104#tabela5>. Acesso em: 04 ago. 2025.

⁸ Por questões de segurança das comunicações aeroespaciais, não foi citada a faixa de telemetria empregada nessa atividade.

⁹ Um exemplo está disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/assuntos/noticias/sfi-prepara-olhos-eletronicos-para-vigiar-o-espectro-em-fernando-de-noronha/>. Acesso em: 17 dez. 2025.

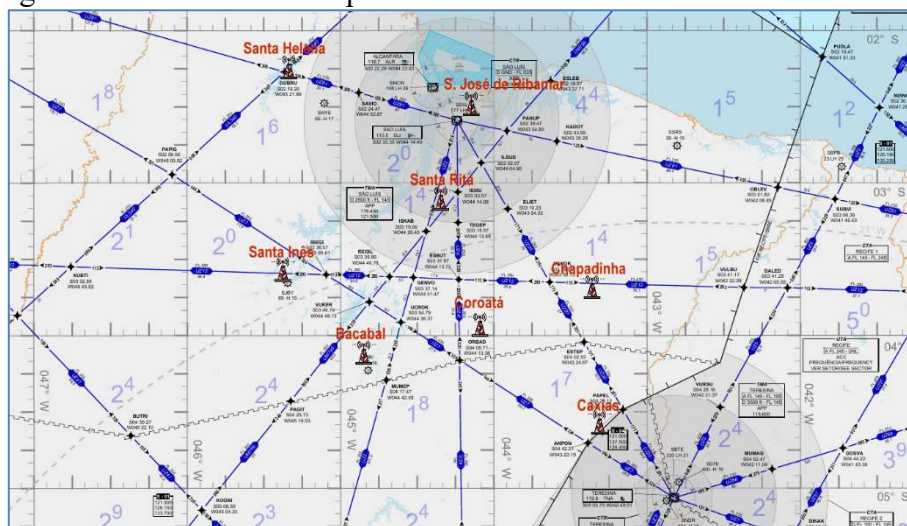
¹⁰ Disponível em: <https://www.gov.br/anatel/pt-br/regulado/fiscalizacao/planos-de-monitoracao>. Acesso em: 10 set. 2025.

¹¹ As faixas espectrais e os serviços que as empregam podem consultadas por meio do endereço: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2025/2001-resolucao-772>. Acesso em: 09 set. 2025.

exemplo, essa faixa é empregada para o funcionamento do *Instrument landing system localizer* (ILS LOC), que auxilia o alinhamento horizontal do pouso da aeronave e o *Very high frequency Omnidirectional Range* (VOR), que, por meio de indicação azimutal, auxilia na identificação da localização dessa estação e, consequentemente, da pista de pouso do aeroporto (ICAO, 2021).

Um aspecto importante a ser observado nessa última faixa reside na adjacência formada com a faixa espectral do serviço de radiodifusão sonora em frequência modulada (FM), que encerra em 108 MHz, deixando-a suscetível às emissões espúrias causadas por mau funcionamento de transmissores operando nessa faixa, autorizados ou não pelo poder público. Em virtude disso e no sentido de garantir a segurança das comunicações aeronáuticas, o monitoramento dessa faixa espectral ganha especial atenção pela Anatel¹².

Figura 11 – Amostra do mapa de rotas aeronáuticas em torno de São Luís



Fonte: trecho extraído do DECEA¹³, 2025.

Em consulta ao sítio eletrônico do Departamento de Controle do Espaço Aéreo (DECEA)¹³, foi obtida amostra do mapa de rotas aeronáuticas tendo como referência a cidade de São Luís/MA, na região centro-norte do mapa e Teresina/PI na região sudeste, conforme Figura 11. O mapa ilustra os percursos dos aviões de passageiros e cargas e guia a escolha de um conjunto de municípios que possuem estações de radiodifusão em FM com potencial de interferência significativa nas comunicações de radionavegação e radiocomunicação aeronáuticas.

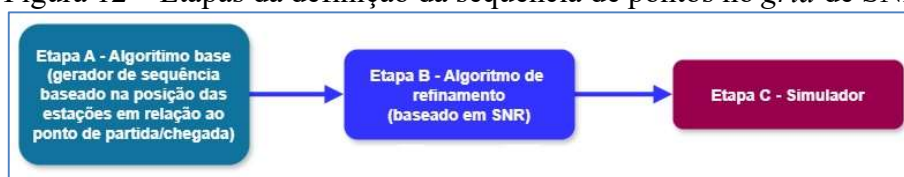
¹² Em agosto de 2025, a Anatel e o Departamento de Controle do Espaço Aéreo (Decea) firmaram acordo de cooperação técnica para aprimorar o tratamento de interferências que afetam as comunicações aeronáuticas. Disponível em: <https://teletime.com.br/14/08/2025/anatel-e-decea-firmam-acordo-para-combater-interferencias-no-trafego-aereo/>. Acesso em: 20 ago. 2025.

¹³ Disponível em: <https://aisweb.decea.mil.br/?i=cartas&p=rotas>. Acesso em 07 out. 2025.

3.7 Planejamento

A etapa de planejamento segue o fluxograma simplificado apresentado na Figura 12 por meio das Etapas A e B. Os parâmetros das estações selecionadas, adicionados à localização da base de partida e retorno do VANT, serão alimentados ao algoritmo de roteamento previsto para execução na Etapa A. Na mesma figura se visualiza a relação dessa etapa com a Etapa B, refinamento da sequência inicial considerando requisitos de radiofrequência baseados em SNR.

Figura 12 – Etapas da definição da sequência de pontos no *grid* de SNR



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Essa consiste em gerar uma sequência a partir de algoritmos tipicamente empregados no PCV. Cabe esclarecer que a depender do quantitativo de estações, pode ser apropriado fazer uso de heurísticas ou meta-heurísticas para a geração da sequência na Etapa A, tais como programação dinâmica, algoritmos genéticos, recozimento simulado.

Para planejar e simular sequências distintas, foram empregados os algoritmos *busca exaustiva*¹⁴, por se tratar de um número reduzido de nós, *Nearest Neighbor*, algoritmo guloso abordado por Solomon (1987), bem como por modelamento na suíte Gekko (Beal *et al.*, 2018), obtendo resultados das Etapas A e B por meio do solver APOPT, conforme fluxo apresentado na Figura 12. Nos dois primeiros casos, a sequência gerada foi então refinada na Etapa B por meio do algoritmo *Hill Climbing* (escalada) descrito na subseção 3.2.

3.8 Simulador

A Figura 13 ilustra o diagrama em blocos e o fluxo de dados que envolve a preparação e planejamento, descrita na subseção anterior, como etapa prévia à simulação, e resultados. Após a configuração dos parâmetros que determinarão o modelo de propagação, comportamento das forças de atração, repulsão, variação do desvio em altitude, frequência monitorada, quantidade de energia inicial e possibilidade de reabastecimento, vetor de obstáculos extensos, passa-se à execução da etapa de simulação.

¹⁴ Considerando pequena quantidade de estações, foi possível encontrar a solução ótima em tempo razoável na etapa de planejamento do roteamento.

Figura 13 – Diagrama em blocos da arquitetura do sistema



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Destaca-se que a Figura 13 apresenta o fluxo macro do processo de otimização-simulação, partindo desde o planejamento aos resultados, cujo pseudocódigo está representado no Algoritmo 3.

Algoritmo 3 - Pseudocódigo do macroprocesso

Algoritmo 3: Pseudocódigo da fluxo macro

início:

```

GerarSequencia(estacoes_posicoes)
ObterParametrosTecnico(estacoes, MosaicoAnatel)
PrepararDados(estacoes_posicoes, sequencia)
SelecionarModeloPropagacao(modelo)
CalcularPerdasERelacaoSNR(mapa)
AjustarPosicoes(estacoes, grid)
RefinarSequencia(sequencia, algoritmo_escalada)
InputSequenciaRefinada(simulador, estacoes_localizacao)
SelecionarModelos(forcas, coeficientes, propagacao, vento)
SelecionarFacilidades(reabastecimento, sequencia_reversa, outros)
ExecutarSimulacao()
RadiolocalizarSinaisNaoAutorizados()
ProduzirResultados(comprimento, tempo, combustivel_consumido)

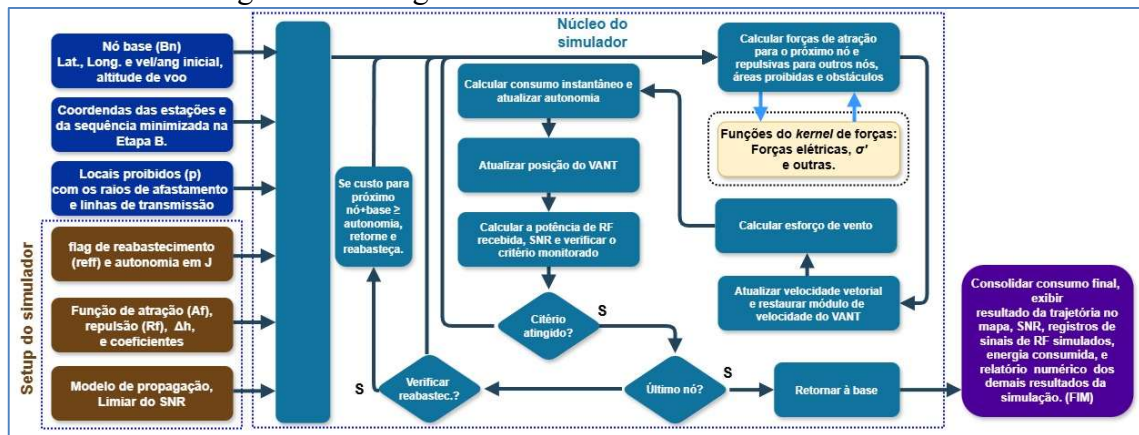
```

fim.

Fonte: produzido pelo autor (2025)

Entretanto, a Figura 14 apresenta o diagrama em blocos simplificado das funções internas do simulador, delineado na figura supra apresentada.

Figura 14 – Diagrama em blocos do núcleo do simulador



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Similarmente, o Algoritmo 4 apresenta o pseudocódigo do simulador.

Algoritmo 4 - Pseudocódigo do macroprocesso

Algoritmo 4: Pseudocódigo do simulador

```
# Setup do simulador
DefinirNoBase(Bn, Lat, Long, VelAngInicial, Altitude)
CarregarCoordenadas(estacoes, sequencia_minimizada)
DefinirLocaisProibidos(p, raios_afastamento, linhas_transmissao)
ConfigurarReabastecimento(flag_reff, autonomia_J)
DefinirFuncoesAtracaoRepulsao(Af, Rf, Ah, coeficientes)
SelecionarModeloPropagacao(modelo, limiar_SNR)
início:
  # Núcleo do simulador
  enquanto (trajetoria_nao_finalizada) faça:
    CalcularConsumoInstantaneo()
    AtualizarAutonomia()
    AtualizarPosicao(VANT)
    CalcularPotenciaRFRecebida()
    CalcularSNR()
    VerificarCritérioMonitorado()
    se (critério_RF_atingido) então:
      RegistrarEvento()
    fim se
    CalcularForcasAtracaoProximoNo()
    CalcularForcasRepulsivas(outros_nos, areas_proibidas, obstaculos)
    CalcularEsforcoVento()
    AtualizarVelocidadeVetorial()
    RestaurarModuloVelocidade(VANT)
    se (ultimo_no) então
      RetornarBase()
    fim se
    se (custo_proximo_no + custo_base >= autonomia) então
      ReformarSequencia()
      Reabastecer()
    fim se
  fim enquanto
  # Consolidação final
  ConsolidarConsumoFinal()
  ExibirTrajetoriaMapa()
  RegistrarSinaisRFSimulados()
  CalcularEnergiaConsumida()
  GerarResultadoNumerico()
fim.
```

Fonte: produzido pelo autor (2025)

As etapas apresentadas no pseudocódigo do Algoritmo 4 contempla a etapa inicial, onde são definidos os parâmetros fundamentais da simulação, incluindo posição de partida, restrições espaciais e condições de propagação; o núcleo, que representa o ciclo iterativo da simulação, onde o VANT atualiza sua posição, verifica critérios de medição de radiofrequência e ajusta sua trajetória conforme forças externas e restrições ambientais. Ao término da simulação, os resultados são organizados em métricas quantitativas e representações gráficas, permitindo análise crítica da trajetória e desempenho.

4 SIMULAÇÕES E RESULTADOS

A partir de parâmetros reais de estações emissoras de sinais de radiofrequência, bem como a delimitação do contexto da simulação partindo desde a etapa de planejamento inicial da sequência de estações a serem monitoradas, refinamento da solução, execução da simulação considerando aspectos de consumo de energia, desvio de obstáculos e identificação de emissão clandestina de sinais interferentes, serão apresentadas as premissas e os resultados dos experimentos desenvolvidos a partir do modelo implementado.

O simulador e experimentos foram implementados em Python, em ambiente Jupyter Notebook, em microcomputador dotado de sistema operacional Windows10 Pro (64 bits), versão 22H2, processador Intel(R) Core(TM) i5-3470 CPU @ 3.20GHz, 16 GBytes de memória RAM, armazenamento 466 GB SSD CT500BX500SSD1, placa de vídeo NVIDIA GeForce G210 (973 MB) e Intel(R) HD Graphics (32 MB).

4.1 Contexto do experimento

A partir dessas considerações e com vistas a realizar a simulação da trajetória a ser realizada pela VANT, delimitando como contexto a atividade necessária para monitorar a faixa de radionavegação aeronáutica do aeroporto de São Luís em relação às estações licenciadas de radiodifusão em FM em municípios próximos à capital do estado, São Luís/MA.

A partir de dados públicos disponíveis no sítio eletrônico da Anatel¹⁵, foram obtidas informações de uma amostra de estações licenciadas para o serviço de FM que se aproximam de parte das rotas apresentadas na Figura 11, juntamente com a localização das sedes municipais de instalação dessas emissoras. A Tabela 3 apresenta os dados básicos dessas estações.

Tabela 3 – Dados de estações de FM

Latitude (GD)	Longitude (GD)	Freq. Operação (MHz)	Ganho de Tx	HCI (m)	ERP (kW)	Elevação (m)	Num. Estação	Município
-4,229911111	-44,77683333	106,5	1	72	1,7406	25,6	50400101840	Bacabal
-4,874438889	-43,34805556	105,9	1	44	3	97,8	50400101688	Caxias
-3,733333333	-43,35	106,1	1	55	0,3	98,7	50415744997	Chapadinha
-4,102180556	-44,11808333	106,3	1	42	4,4166	62,9	50009842853	Coroatá
-2,234447222	-45,30319444	106,3	1	52,5	3	13,5	50414379713	Santa Helena
-3,663611111	-45,38916667	100,3	1	56,24	3	28	18000004720	Santa Inês
-3,139261111	-44,32394444	91,5	1	74	14,722	32,9	50400050595	Santa Rita
-2,5525	-44,2575	99,9	1	68	28,8218	41,4	50003332926	São José de Ribamar

Fonte: Elaborada pelo autor com base em dados extraídos do Mosaico da Anatel, 2025.

Em relação aos dados da Tabela 3, deve-se considerar que:

¹⁵ Disponível em: <https://sistemas.anatel.gov.br/se/public/view/b/srd.php>. Acesso em: 12 set. 2025.

- a) as coordenadas geográficas estão em grau decimal;
- b) as frequências de operação estão em megahertz (MHz);
- c) os ganhos de transmissão (Ganho de Tx) estão em valor absoluto, pois o Mosaico fornece dados de potência efetivamente radiada (ERP) em kW, que já considera o ganho das antenas e perdas gerais;
- d) HCI, ou altura do centro de fase do sistema irradiante, aproximando-se do centro da antena em relação à base da torre;
- e) a elevação refere-se à altitude no local de instalação da torre em relação ao nível do mar; e
- f) o valor “Num. Estação” é a identificação da estação nos sistemas da Anatel.

Os requisitos técnicos das estações de radiodifusão sonora em frequência modulada estão delineados no Ato nº 8104, de 10 de junho de 2022¹⁶, que dispõe, quanto ao funcionamento, por exemplo:

Qualquer emissão presente em frequências afastadas de 120 a 240 kHz, inclusive, da frequência da portadora, deve estar pelo menos 25 dB abaixo do nível da portadora sem modulação; as emissões em frequências afastadas da frequência da portadora de mais de 240 kHz até 600 kHz, inclusive, devem estar pelo menos 35 dB abaixo do nível da portadora sem modulação. As emissões em frequências afastadas de mais de 600 kHz da frequência da portadora devem estar $(73+P)$ dB (P = potência de operação do transmissor, em dBk) abaixo do nível da portadora sem modulação, sendo 80 dB a maior atenuação exigida. (ANATEL 2022).

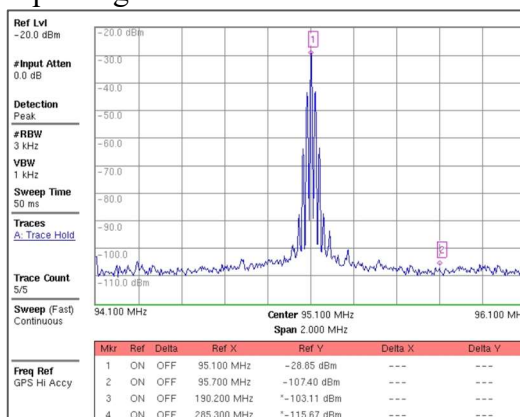
No caso, as estações selecionadas apresentam, em sua maioria, potências elevadas, na casa de alguns quilowatts, apresentando potencial para interferir na faixa de radionavegação ou radiocomunicação aeronáutica em caso de funcionamento inadequado de qualquer dos transmissores. Observa-se que a norma da Anatel admite a emissão de sinais espúrios, desde que limitados ao mínimo de 73 dB em relação à portadora sem modulação, sendo exigível o máximo de 80 dB nas mesmas condições.

Basicamente, essa leitura é realizada medindo-se o nível de sinal da portadora da emissora e subtraindo-o do valor do maior sinal emitido pela estação, afastado de 600 kHz ou mais. A Figura 15 apresenta um exemplo de espectrograma contendo medições em relação à portadora (ponto 1) e em frequência afastada em +600 kHz (ponto 2), onde se constata uma diferença de $-28,85 \text{ dBm} - (-107,40 \text{ dBm}) = 78,55 \text{ dB}$. A aproximação do VANT a uma

¹⁶ Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/atos-de-requisitos-tecnicos-de-gestao-do-espectro/2022/1687-ato-8104>. Acesso em: 01 de ago. 2025.

distância suficientemente próxima da estação proporcionará também a verificação da correteza do funcionamento da estação em relação a essa obrigação.

Figura 15 – Espectrograma de emissora sintonizada em 95,1 MHz



Fonte: adaptado pelo autor a partir de relatório de fiscalização disponível publicamente¹⁷, 2025.

O Ato nº 5.171, de 9 de maio de 2023, publicado pela Anatel, define que a potência entregue à antena do sistema ILS LOC deve ser de 5 watts. Deve-se lembrar que esse sistema apenas emite sinais que são captados pelas aeronaves, inexistindo recepção em sentido contrário. A atividade de monitoramento deve então identificar emissões que possam afetar o bom funcionamento desse sistema do ponto de vista da aeronave.

Interessa-nos, portanto, na atividade de monitoramento espectral e de forma genérica, identificar emissões presentes em uma determinada faixa, mas que não possuem características coerentes com as emissões pertinentes a essa faixa. Por exemplo, a largura do canal de FM é fixada em 200 kHz, e o máximo desvio de frequência é de ± 75 kHz, ocupando, portanto, 150 kHz da largura de faixa do canal.

O sistema ILS LOC utiliza a faixa compreendida entre 108,10 e 111,95 MHz, que contém 40 canais não uniformemente distribuídos em canais de 50 e 100 kHz, suscetíveis a interferências oriundas do primeiro serviço. O sinal do ILS LOC é modulado por dois tons, um de 90 Hz e outro de 150 Hz. Segundo a ITU (2022, p. 15), a receptor do ILS LOC montado na aeronave apresenta largura de banda de 30 kHz, indicado que, potencialmente, qualquer sinal com largura de banda superior a esse patamar, constituir-se-á por sinal interferente.

Além disso, em atividade de pós-processamento a partir do log a ser realizado pelo sistema de coleta de dados do VANT, sem prejuízo do emprego de técnicas determinísticas existentes, podem ser empregados algoritmos de aprendizagem de máquina, tais como redes neurais, árvores de decisão, no sentido de automaticamente identificar sinais estranhos à faixa

¹⁷ Relatórios de fiscalização são documentos públicos e estão disponíveis no Sistema Eletrônico de Informações da Anatel (SEI).

do serviço em função de características como largura de banda, modulação, sinais I/Q de banda base após demodulação.

Considerando que, em São Luís, a frequência de operação no aeroporto Marechal Cunha Machado é 109,3 MHz¹⁸, com o propósito de simular um sinal interferente na faixa do ILS LOC, foi instalada o equivalente a uma estação clandestina hipotética cujo funcionamento resulte na emissão de sinais indesejados na faixa do ILS LOC conforme tabela abaixo.

Tabela 4 – Dados de estação hipotética emitindo sinais interferentes no ILS LOC

Latitude (GD)	Longitude (GD)	Freq. Operação (MHz)	Ganho de Tx	HCI (m)	ERP (kW)	Elevação (m)	Num. Estação	Município
-4,313664	-43,45	109,3	1	30	0.2	52,7	1	Caxias

Fonte: dados hipotéticos elaborado pelo autor.

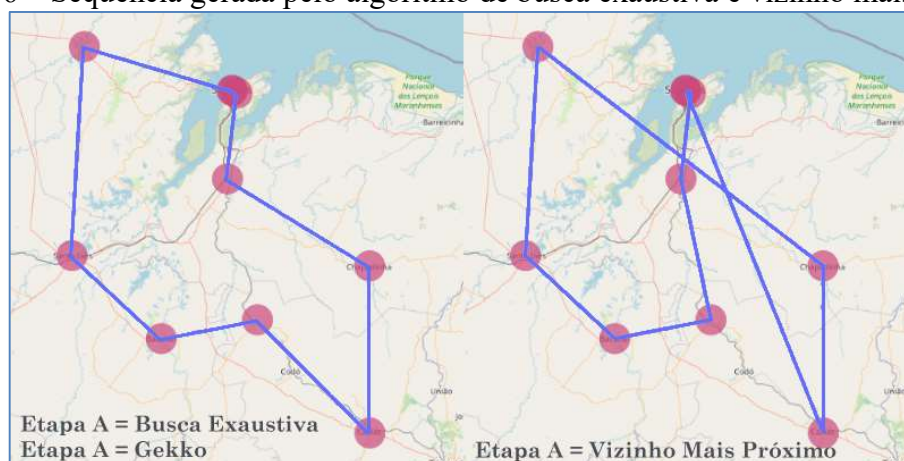
Portanto, como exemplo de simulação de monitoramento espectral, pretende-se simular o monitoramento por meio de instrumento hipoteticamente montado em VANT de asa fixa, que percorrerá trajetória previamente planejada no sentido de garantir a leitura adequada das estações de radiodifusão conhecidas em menor gasto de energia, facilitando a identificação de emissões não autorizadas de sinais ao longo da trajetória, considerando a disposição real das estações de FM apresentadas na Figura 11 e a estação hipotética apresentada na Tabela 4.

4.2 Geração de sequência e refinamento da solução

A partir dos dados preparados, foram executados os algoritmos associados à Etapa A, incluindo a geração de sequência inicial pelo *solver* APOPT, conforme Figura 16. Nos vértices da trajetória, representados pelos pontos em vermelho, residem as coordenadas geográficas das estações apresentadas na Tabela 3. Merece destaque o resultado obtido pelo APOPT na suíte Gekko, que apresentou o mesmo resultado encontrado por meio do algoritmo de busca exaustiva, que, por simplificação, estão ilustrados conjuntamente na área esquerda da Figura 12.

¹⁸ Disponível em: <https://aisweb.decea.mil.br/download/?arquivo=8f154d9d-772c-4333-8152be86dc7707a8&apikey=1587263166>

Figura 16 – Sequência gerada pelo algoritmo de busca exaustiva e vizinho mais próximo



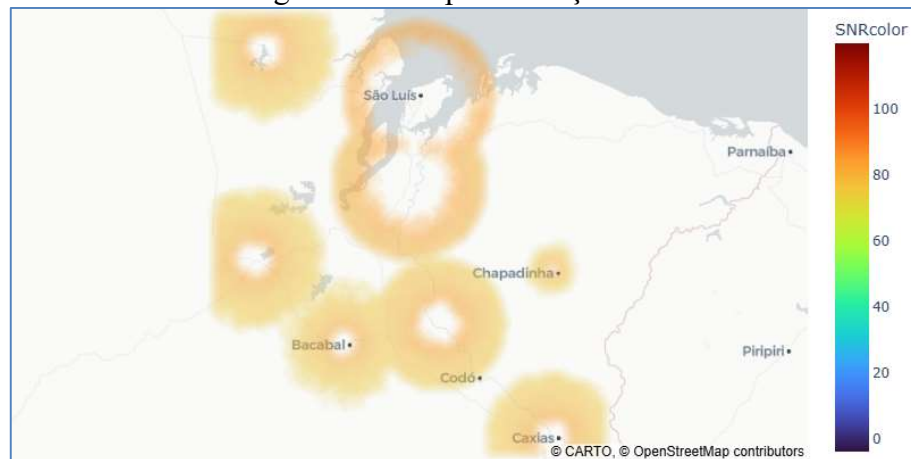
Fonte: produzido pelo autor (2025)

A sequência gerada é então submetida ao refinamento previsto na Etapa B, que gerará um conjunto de pontos que atendem ao critério estabelecido da $SNR \geq 73$ dB, respeitando o limite hipotético de proteção do sensor de 85 dB em relação a esse mesmo parâmetro. Trata-se de medida que visa evitar aproximação exagerada do VANT em relação ao ponto de instalação da estação, uma vez que os instrumentos reais apresentam limites de potência de entrada, que, quando excessiva, podem causar, pelo menos, distorção nas leituras¹⁹.

A partir dos parâmetros das estações de radiodifusão em FM que serão fiscalizadas e do modelo de perdas de propagação selecionado, se obtém o mapa de sinais apresentado na Figura 17. Esse mapa é constituído por uma matriz de 121x106 pontos, entre os quais há um subconjunto de pontos que atendem ao critério de leitura adequada das estações de FM. O raio das áreas em que são calculados os valores do SNR são definidos a partir do momento em que o VANT alcança aproximação da estação em distância menor que o horizonte de rádio, conforme detalhado na subseção 3.3.

¹⁹ Mais detalhes podem ser conhecidos em: <https://tinyurl.com/3ky5ne6w>. Acesso em: 21 dez. 2025.

Figura 17 – Mapa da relação SNR



Fonte: produzido pelo autor (2025)

O *grid* é formado por 12.600 pontos, entre os quais há 4.757 pontos com valores da $73 \leq \text{SNR} \leq 85$ dB. Foi extraída a quantidade desses pontos para cada uma das estações licenciadas a funcionar nos respectivos municípios, conforme Tabela 5. Observa-se que o número de pontos elegíveis cresce proporcionalmente à potência efetivamente radiada (ERP), mas é limitado pelo horizonte de rádio.

No caso da estação localizada em São José de Ribamar, como o VANT parte de ponto próximo em São Luís, a leitura é inevitavelmente efetuada no instante da decolagem.

Tabela 5 – Quantidade de pontos com $73 \leq \text{SNR} \leq 85$ dB

Latitude (GD)	Longitude (GD)	ERP (kW)	HCI (m)	Q. Pontos SNR ≥ 73 dB	Município
-2,234447222	-45,30319444	3	52,5	708	Santa Helena
-3,663611111	-45,38916667	3	56,2	828	Santa Inês
-4,229911111	-44,77683333	1,7406	72,0	561	Bacabal
-4,102180556	-44,11808333	4,4166	42,0	875	Coroatá
-4,874438889	-43,34805556	3	44,0	526	Caxias
-3,733333333	-43,35	0,3	55,0	107	Chapadinha
-3,139261111	-44,32394444	14,722	74,0	677	Santa Rita
-2,5525	-44,2575	28,8218	68	475	São José de Ribamar

Fonte: produzido pelo autor (2025)

A combinação de rotas possíveis a partir dos pontos que atendem ao critério do SNR em torno de cada estação de FM alcança a ordem de grandeza de 10^{21} . Em função do esforço computacional necessário para explorar esse espaço de busca, optou-se pela abordagem já discutida nas subseções 3.1 e 3.2. Deve-se considerar, nesse caso, que o gerador de sequência terá que lidar com apenas 8 estações no contexto apresentado, em um espaço de busca de somente 40.320 permutações, resultando na sequência que será refinada na etapa posterior.

Figura 18 – Refinamento obtido na etapa B



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Os nós representados na Figura 18 pelos pontos de maior raio representam as posições das estações cadastradas no sistema Mosaico da Anatel, conjunto de nós V , e os nós representados por pontos de menor raio representam o conjunto V' obtidas após o refinamento executado na Etapa B, cujos trechos a serem percorridos estão ilustrados na Figura 19.

Figura 19 – Ilustração de rotas reduzidas a partir da etapa B



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Os resultados dos percursos estão sintetizados na Tabela 6, cujos valores obtidos na Etapa B, que compreende a soma dos trechos apresentados nas figuras acima, por se tratar de etapa de planejamento, não consideram os arcos gerados pelo VANT quando da mudança de direção. Adianta-se que esses trechos serão computados na etapa de simulação.

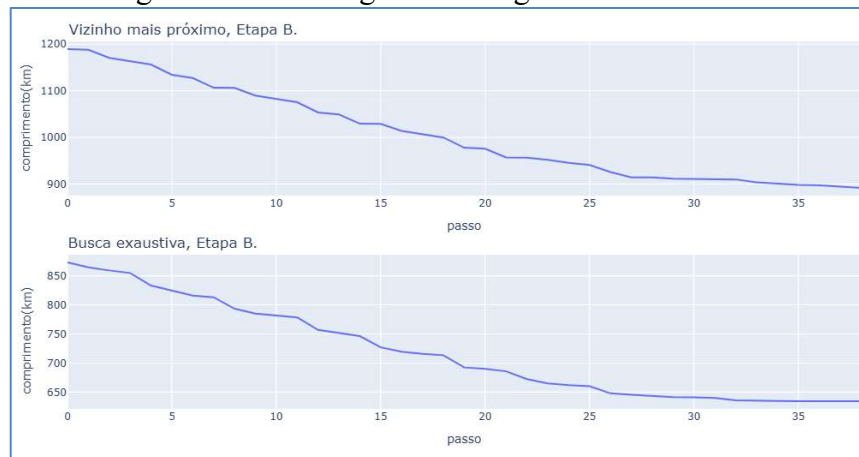
Tabela 6 – Resultados obtidos a partir da etapa de planejamento

Etapa	APOPT Solver (Gekko)	Busca Exaustiva	Vizinho mais próximo
Planejamento Etapa A	889,08 km	889,08 km	1187,80 km
Planejamento Etapa B	615,66 km	634,35 km	892,60 km
Diferença percentual	-30,75%	-28,65%	-24,85%

Fonte: produzido pelo autor (2025)

A execução do algoritmo de escalada resultou em convergência rápida dos resultados tanto para a sequência gerada pelo algoritmo de busca exaustiva quanto para a sequência obtida por meio do vizinho mais próximo, assim como o solver APOPT, conforme detalhes no Apêndice A. Destaca-se que essa celeridade foi influenciada pela resolução do grid combinada com o subconjunto de pontos elegíveis. A Figura 20 ilustra o resultado.

Figura 20 – Convergência do algoritmo de escalada



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Deve-se observar que os valores das abscissas representam o passo na execução, ou seja, a execução completa de um ciclo ao longo de todos os pontos alvo, ocorrendo, em cada ponto alvo, a verificação dos 8 possíveis movimentos.

A partir das posições das estações refinadas na Etapa B, dos ajustes de coeficientes e parâmetros que modulam a intensidade da força atrativa, repulsiva e altitude, velocidade e ângulo do vento constantes, seleção do modelo de propagação demais parâmetros apresentados na Tabela 7, executa-se o algoritmo do simulador tendo como sequência as rotas de *busca exaustiva* e *vizinho mais próximo* refinadas pela Etapa B.

Tabela 7 – Parâmetros de configuração do simulador

Parâmetro	APOPT Solver (Gekko)	Busca Exaustiva	Vizinho mais próximo	Unidade
Massa	1	1	1	kg
Dt	10	10	10	s
Vel. Cruzeiro	100	100	100	km/h
Direção de Partida (NV)	135	135	135	°
Velocidade do vento	25	25	25	km/h
Direção do vento (NV)	30	30	30	°
Algoritmo atração	eletrostática	eletrostática	eletrostática	---
Algoritmo repulsão	derivada da logística	derivada da logística	derivada da logística	---
Algoritmo rep. altitude	derivada da logística	derivada da logística	derivada da logística	---
Coef. Atração	300000	300000	300000	---
Coef. repul. obstác.	4700	4700	4700	m
Coef. repul. estações	1000	1000	1000	m
Altitude de cruzeiro	30	30	30	m
Dh	70	70	70	m
Energia de voo	2100000	2100000	2100000	J
Modelo de propagação	Free-space	Free-space	Free-space	---
Frequência monitorada	109,3	109,3	109,3	MHz
Faixa fiscalizada	88 - 108	88 - 108	88 - 108	MHz

Fonte: produzido pelo autor (2025)

Após a execução do simulador, obteve-se os traçados ilustrados na Figura 21 para ambas as sequências refinadas.

Figura 21 – Trajetórias realizadas pelo VANT no simulador

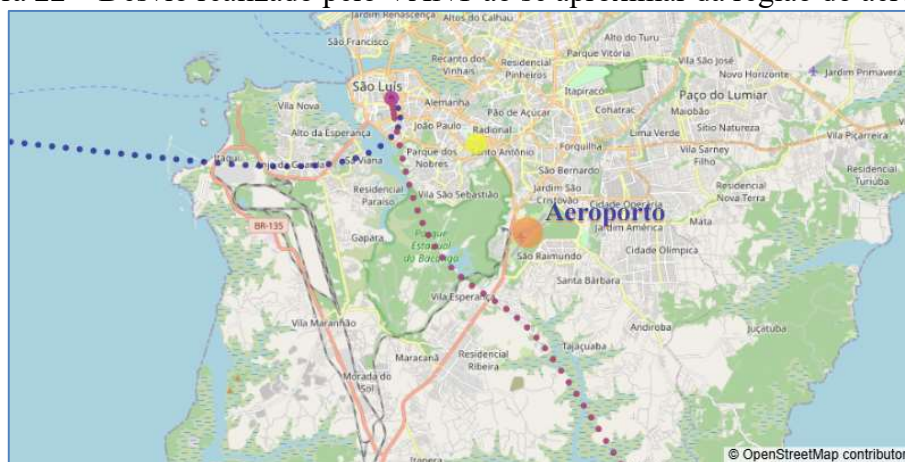


Fonte: produzido pelo autor (2025)

Os segmentos em vermelho representam o trecho de retorno para a base. Deve-se notar que o simulador, para o caso da sequência do *vizinho mais próximo*, no deslocamento do ponto localizado em Santa Inês em direção ao ponto na nuvem de Bacabal, encontrou um ponto que atende ao critério do limiar do SNR, dada a distribuição circular dos pontos elegíveis no entorno da estação, provocando mudança antecipada de direção para o próximo ponto da sequência.

Essa conclusão pode ser extraída entre os trechos simulados na Figura 21 e os trechos planejados na Figura 19. Além disso, esse resultado se deu em função da distribuição circular dos pontos elegíveis no entorno da estação fiscalizada. Em relação aos desvios que provocam aumento na trajetória, está ilustrada na Figura 22, como exemplo, o desvio realizado pelo VANT ao aproximar-se do aeroporto em respeito às especificações supra apresentadas.

Figura 22 – Desvio realizado pelo VANT ao se aproximar da região do aeroporto



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Os resultados numéricos da simulação estão apresentados na Tabela 8.

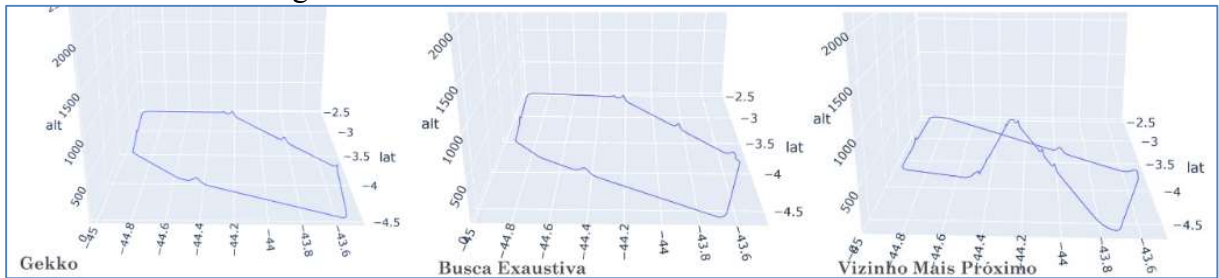
Tabela 8 – Resultados da etapa de simulação

Etapa	APOPT Solver (Gekko)	Busca Exaustiva	Vizinho mais próximo
Planejamento Etapa B	615,66 km	634,35 km	892,60 km
Simulação	624,41 km	640,40 km	898,72 km
Diferença percentual	1,40%	0,95%	0,68%

Fonte: produzido pelo autor (2025)

Adicionalmente, a Figura 23 ilustra a variação da altitude de voo em função do desvio ao longo do eixo vertical em relação ao modelo de linhas de transmissão de energia em alta tensão. Foi configurado $\Delta h = 70$ metros, significando que o ápice da altitude do voo será 70 metros acima da altitude de cruzeiro. Na mesma figura é possível identificar os trechos em que o VANT realizou alteração de altitude, devendo-se observar que os eixos não estão na mesma escala e unidade.

Figura 23 – Desvio vertical das linhas de transmissão



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Para a execução da trajetória, o VANT sofreu esforço de vento configurado conforme especificações anteriormente apresentadas, caracterizada por velocidade e direção angular. O perfil de consumo de energia resultante do gasto necessário no ponto quiescente, adicionado aos efeitos do vento ao longo da trajetória, está apresentado na Figura 24.

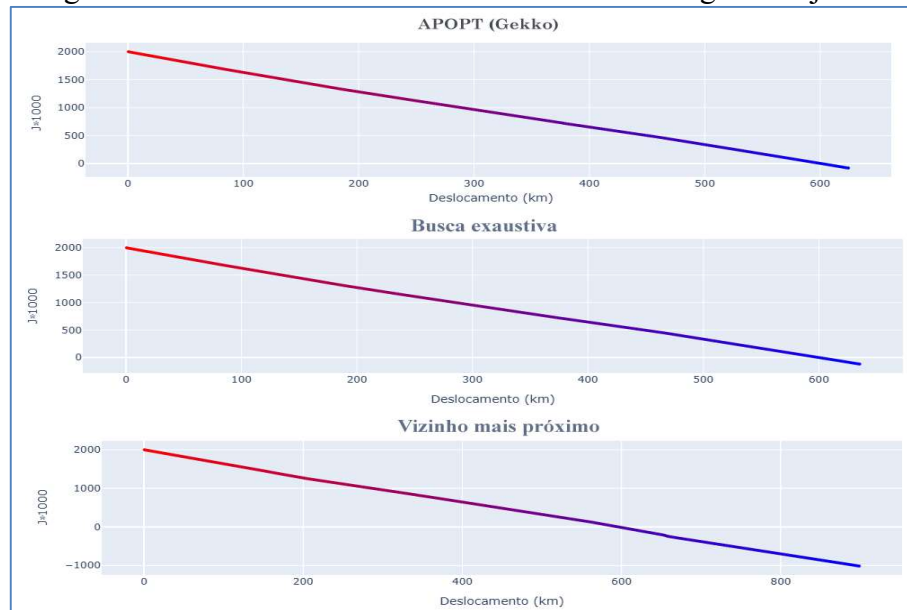
Figura 24 – Perfil de consumo instantâneo ao longo da trajetória



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Pode-se verificar que as mudanças de direção e sentido, que resultaram em componentes no mesmo sentido do voo, impactaram positivamente no consumo, reduzindo-o a valores abaixo do consumo de cruzeiro, definido para 100 J/s, equivalente a 100 watts. Como resultado, considerando a execução de trajetória sem a função de reabastecimento, a Figura 25 apresenta a evolução do consumo exigido, que apresenta inclinação variável.

Figura 25 – Curva da reserva de combustível ao longo da trajetória

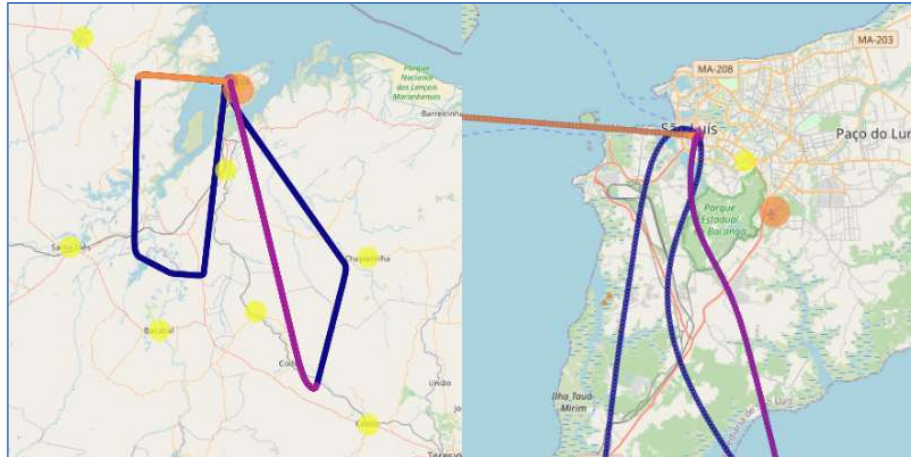


Fonte: produzido pelo autor (2025)

É possível observar que a partir das configurações fixadas, o consumo não foi suficiente para executar completamente a rota, uma vez que o valor final de energia apresentou saldo negativo. Isso indica que se deve ou aumentar a energia para o cumprimento integral da missão, ou habilitar o algoritmo de reabastecimento.

Como prova de conceito e perante a ausência de informações de um modelo comercial, tomando-se como valor inicial de energia $CapT = 1800000$ J, a simulação do percurso do *vizinho mais próximo* apresenta os resultados mostrados na Figura 26. Nela, se nota o desvio realizado pelo VANT na região do aeroporto, respeitando o limite configurado de 4700 m, durante o retorno à base (linha vermelha) ao final da simulação. A linha em laranja representa o retorno para reabastecimento.

Figura 26 – Trajetória do vizinho mais próximo considerando reabastecimento



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Os resultados numéricos contendo o comparativo entre o percurso sem reabastecimento e com reabastecimento estão disponíveis na Tabela 9.

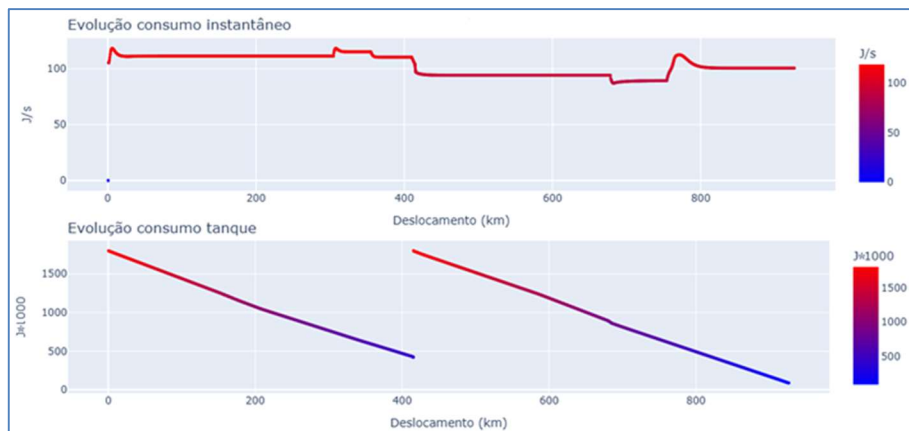
Tabela 9 – Resultados obtidos em simulação com reabastecimento

Simulação	Vizinho mais próximo
Sem reabastecimento	898,72 km
Com reabastecimento	926,32 km

Fonte: produzido pelo autor (2025)

O efeito do esforço de vento sobre o VANT e, por conseguinte, no consumo, está apresentado na Figura 27, onde se observa a restauração na linha de consumo em função da execução do reabastecimento, bem como as variações em favor da redução do consumo, quando a primeira curva está abaixo do ponto quiescente e em favor de maior consumo, quando as curvas estão acima da linha do referido ponto.

Figura 27 – Perfil de consumo considerando efeitos do vento e reabastecimento

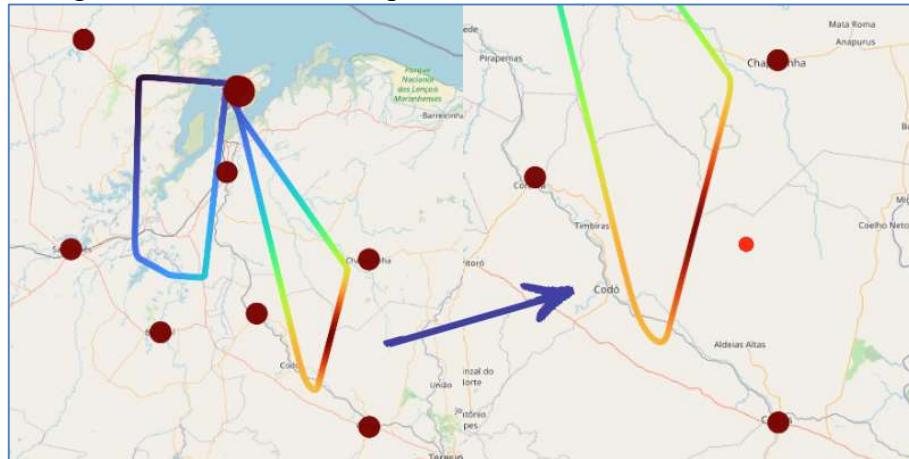


Fonte: produzido pelo autor (2025)

Acerca do *log* registro dos sinais de radiofrequência na faixa do ILS LOC, referentes à estação hipotética, instalada nas proximidades do município de Codó, conforme coordenada

geográfica apresentada na Tabela 4, a Figura 28 exibe o mapa da variação dos sinais ao longo da trajetória. Trata-se de um modelo ideal, simplificado, que não contempla os efeitos de desvanecimento de Rice, como analisado em Schwartz (1979, p. 318).

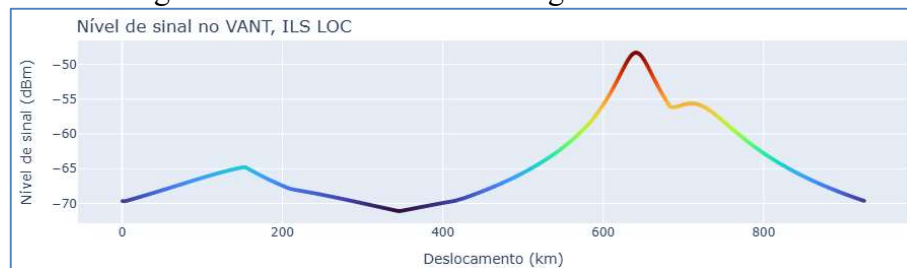
Figura 28 – Detalhe do mapa de sinal de RF no canal monitorado



Fonte: produzido pelo autor (2025)

A Figura 29 apresenta a variação do nível de sinal calculado ao longo do deslocamento, onde se nota a presença de dois picos relevantes, um dos quais demonstra forte aproximação em relação à fonte emissora desconhecida. Do ponto de vista da simulação, foi calculada a perda de propagação ao longo de toda a trajetória, entretanto, em condições reais, os sinais passariam a ser detectados no limiar do horizonte de rádio, conforme calculado em (12) na subseção 3.3.

Figura 29 – Perfil de sinal ao longo do deslocamento



Fonte: produzido pelo autor (2025)

A execução da rotina de geolocalização em ambiente de pós-processamento, realizado a partir do *log* de dados coletados ao longo do voo pelo sensor, auxilia na estimativa da posição da fonte emissora a partir da execução do Algoritmo 2. A filtragem em -60 dBm excluiu o mínimo local detectado antes dos 200 km e que não contribui para a localização, resultando nos segmentos ilustrados na Figura 30.

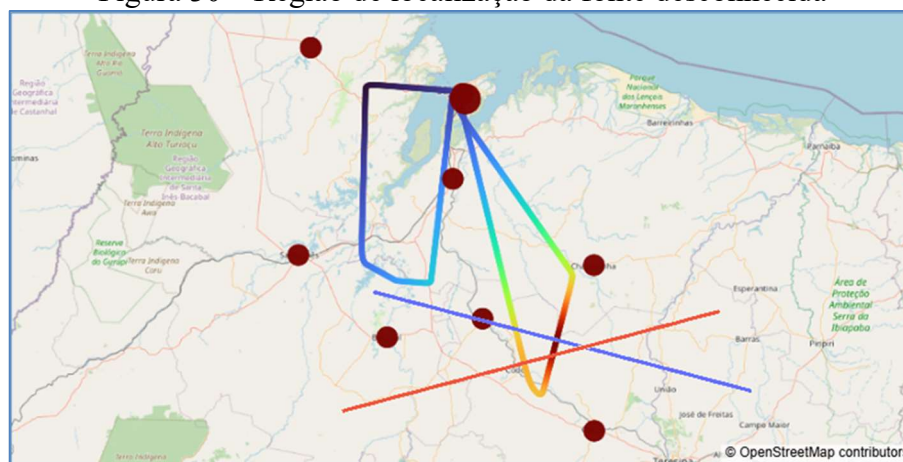
Tabela 10 – Diferença entre o ponto definido e resultado simulado

Origem	Latitude (GD)	Longitude (GD)	Freq. Operação (MHz)	Distância
Dado fixado	-4,313664	-43,45	109,3	--
Resultado Simulado	-4,31356396	-43,46466821	109,3	1,62 km

Fonte: produzido pelo autor (2025)

O resultado obtido a partir da simulação, apresentado na Tabela 10, demonstra que o algoritmo proposto se apresenta como ponto de partida para implementações mais avançadas no sentido de auxiliar na tarefa de localização da fonte emissora a partir da coleta de sinais efetuada em condições reais. Além disso, em condições reais, os sinais precisarão passar por tratamento previamente à geolocalização com vistas a mitigar os efeitos do desvanecimento, ruídos, melhorando a exatidão da localização da possível fonte emissora.

Figura 30 – Região de localização da fonte desconhecida



Fonte: produzido pelo autor (2025)

As linhas apresentadas na Figura 30 são obtidas a partir da implementação básica da definição das coordenadas dos extremos dos segmentos de reta perpendiculares à reta suporte de direção do VANT nas regiões com máximos locais de intensidade de sinal, reduzindo-se a quantidade de segmentos de reta e aperfeiçoando a definição da posição da possível fonte emissora não autorizada. Deve-se considerar que o VANT não sabe, a priori, a localização da estação não autorizada e, nesse caso, não foi calculado o horizonte de rádio, que reduziria o raio de detecção em condições reais.

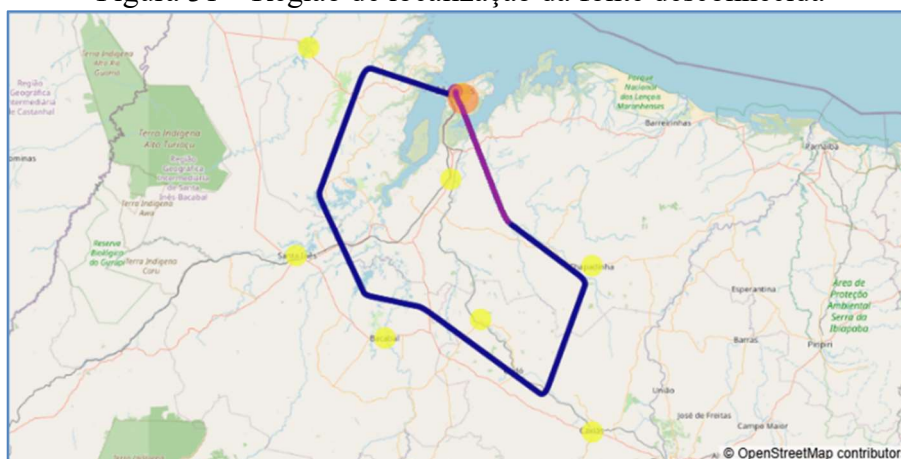
Apesar dessa possibilidade, cuja identificação se dá por meio da variação do nível do sinal monitorado em um conjunto de pontos, é importante mencionar que existem antenas especiais que podem ser montadas diretamente no VANT com a funcionalidade de indicar a direção de uma emissão à medida que se desloca na trajetória, tornando imediata a radiolocalização e permitindo a implementação de algoritmos de averiguação e registro fotográfico da região suspeita.

4.3 Execução da simulação imediatamente após a da Etapa A

A simulação de trajetória do VANT baseada puramente nos modelos e parâmetros de forças, e em cumprimento da sequência gerada somente pela Etapa A, demonstra que, mesmo sem a execução do refinamento na Etapa B, o resultado obtido é comparável a aqueles gerados pelos algoritmos de refinamento em escalada e pelo solver APOPT. Isso ocorre porque o modelo de forças permite que o VANT ajuste dinamicamente sua rota em resposta aos sinais de radiofrequência monitorados e às restrições de desvios impostas.

A Figura 31 ilustra o resultado da simulação a partir da sequência gerada no algoritmo de busca exaustiva da Etapa A. É possível observar que o VANT se dirige diretamente à coordenada geográfica da estação e sua mudança de direção ocorre ao alcançar o critério de medição definido, tal como o SNR ou nível de potência em dBm.

Figura 31 – Região de localização da fonte desconhecida



Fonte: produzido pelo autor (2025)

A Tabela 11 sintetiza os resultados obtidos em comparação à simulação sem refinamento. Observa-se que o resultado obtido reduziu o comprimento inicial em 21,47%.

Tabela 11 – Resultados comparados à simulação de sequência sem refinamento

Etapa	APOPT Solver (Gekko)	Busca Exaustiva refinado por escalada	Simulação Busca Exaustiva sem refinamento
Planejamento Etapa A	889,08 km	889,08 km	889,08 km
Planejamento Etapa B	615,66 km	634,35 km	---
Simulação	624,41 km	640,40 km	698,11 km
Redução em relação a A	29,76%	27,29%	21,47%

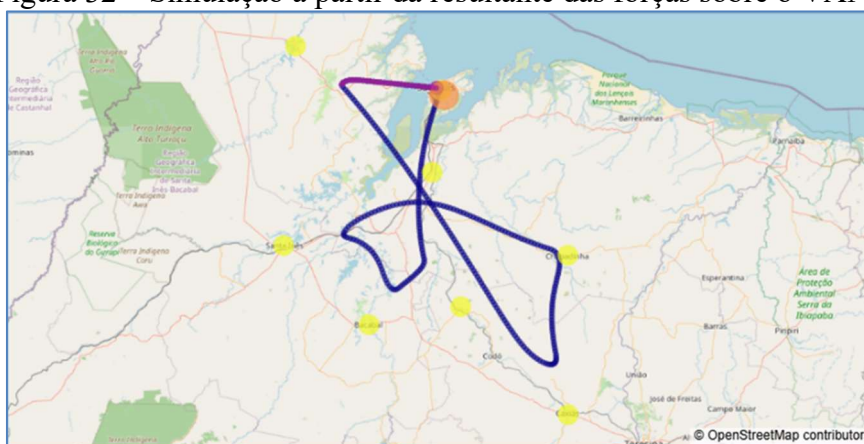
Fonte: produzido pelo autor (2025)

Ao alcançar o critério estabelecido, considera-se que a missão de medição daquela estação foi cumprida, permitindo ao veículo seguir para a próxima estação da sequência ou retorno para o ponto de partida. Dessa forma, o simulador não apenas otimiza o percurso, mas também garante que cada estação seja monitorada de forma criteriosa e adaptativa.

4.4 Simulação sem geração de sequência na Etapa A

Outra possibilidade reside na simulação de trajetória sem a geração de uma sequência na Etapa A. A trajetória apresentada na Figura 32 não resulta de uma sequência previamente definida por algoritmos clássicos, mas sim da mera resultante das forças atribuídas às cargas elétricas fictícias localizadas nas coordenadas de cada estação. O VANT é continuamente atraído pela soma vetorial dessas forças, ajustando sua direção de voo conforme a distribuição espacial das estações e suas distâncias relativas.

Figura 32 – Simulação a partir da resultante das forças sobre o VANT



Fonte: produzido pelo autor (2025)

A Tabela 11 sintetiza os resultados obtidos em comparação à simulação sem refinamento. Observa-se que o resultado obtido superou o resultado alcançado pelo algoritmo do vizinho mais próximo mesmo após o refinamento por escalada.

Tabela 12 – Resultados comparados à simulação sem sequenciamento prévio

Etapa	APOPT	Vizinho mais próximo	Sem sequenciamento (carga de prova solta)
Simulado com Etapa B	624,41 km	898,72 km	---
Sem planejamento	---	---	875.10 km
Diferença percentual	40,82%	-2,52%	---

Fonte: produzido pelo autor (2025)

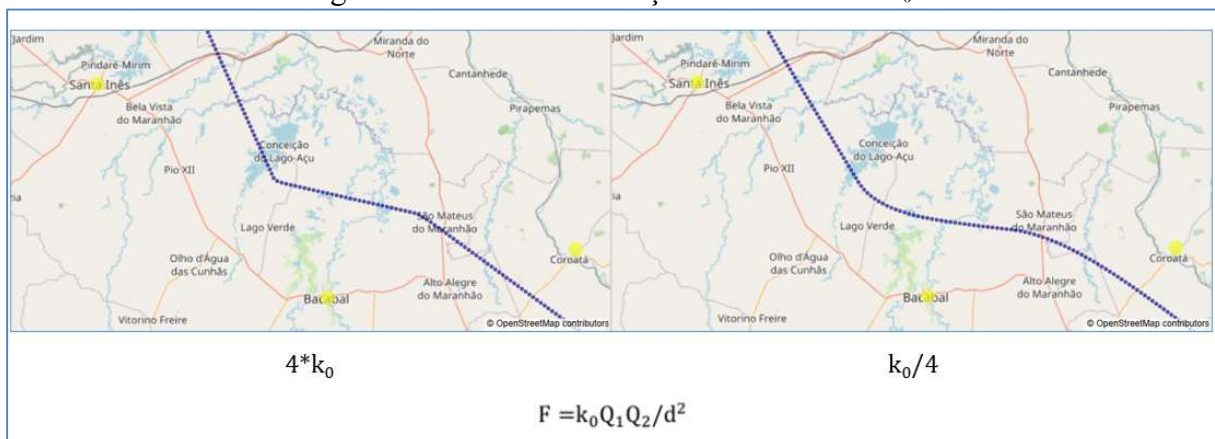
É possível observar que o VANT descreve trajetória curvilínea causada pela variação das forças à medida que ele se desloca. Destaca-se que sua mudança de direção ocorre ao alcançar o critério de medição definido, tal como o SNR ou nível de potência em dBm, eliminando o efeito de forças da estação adequadamente lida pelo cumprimento do critério. Cada eliminação causa alteração significativa no efeito das forças resultantes, impedindo que o VANT se direcione a um determinado ponto cuja resultante das forças seria 0, deixando estático.

Assim, a sequência de visitação emerge naturalmente do campo de forças, sem necessidade de uma ordenação explícita. Esse mecanismo confere ao simulador um caráter adaptativo, em que a rota é consequência direta da interação entre forças e medições, dispensando cálculos prévios de sequência.

4.5 Efeito da variação do valor do coeficiente de força atrativa

A Figura 33 evidencia como a variação do coeficiente de atração k_0 influencia diretamente a trajetória do VANT definida pelos pontos azuis no mapa. Por exemplo, quando o coeficiente é reduzido para $k_0/4$, a intensidade da força de atração diminui, resultando em trajetórias mais suaves e curvilíneas, nas quais o veículo tende a se desviar mais suavemente no procedimento de mudança de direção, conforme área direita da figura.

Figura 33 – Efeito da variação do coeficiente k_0



Fonte: produzido pelo autor (2025)

Por outro lado, no caso de aumento para $4 \cdot k_0$, a força de atração se torna mais intensa, conduzindo o VANT em trajetórias mais retilíneas e diretas em direção aos pontos-alvo, com menor tolerância a desvios. Essa diferença mostra que o ajuste do parâmetro k_0 atua como um fator de controle da rigidez ou flexibilidade da rota, permitindo calibrar o comportamento do simulador entre maior eficiência energética (trajetos mais curtos e retos) e maior adaptabilidade ao ambiente (trajetos mais longos e suaves).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho se propôs a implementar uma proposta de simulador de trajetória para VANT de asa fixa aplicado ao monitoramento espectral de radiofrequências com vistas a servir como uma solução inicial para o problema de roteamento desse veículo em contexto definido por parâmetros reais de radiofrequência, modelos de propagação, existência de obstáculos horizontais e verticais, bem como a limitação de energia para cumprimento da trajetória planejada.

A abordagem baseada na geração de sequência de nós a serem visitados a partir de algoritmos conhecidos de roteamento aplicados ao PCV, seguido de refinamento por meio do algoritmo de escalada e pelo solver APOPT na suíte Gekko demonstraram ser eficazes para propor solução em espaço de busca definido por meio de restrições de radiofrequência que ampliam o espaço de busca inicial quando o equivalente a um nó passa a ser representado por um conjunto de dezenas ou centenas de nós, de acordo com a granularidade ou resolução projetada no mapa.

A partir da localização das 8 (oito) estações licenciadas, tendo como base de partida e retorno um ponto fixo adicional, foi observado que o refinamento da sequência ótima tanto pelo algoritmo de escalada quanto pelo solver APOPT, resultou em redução percentual em torno de 30% da trajetória definida pelo comprimento total obtido ao longo da sequência de estações obtida na Etapa A, com vantagem de dois pontos percentuais para o solver APOPT.

Além disso, a simulação resultou em incremento percentual máximo de 1,40% em relação ao trajeto planejado, resultante da necessidade de afastamentos horizontais de zonas proibidas combinados com desvios verticais em função dos desvios das linhas de transmissão de energia, bem como da realização de curvas nos vértices do polígono definido pelas coordenadas geográficas obtidas no refinamento na Etapa B. Recorda-se que o contexto de radiofrequências eleva a ordem de grandeza das instâncias na Etapa B para 10^{21} em função das nuvens de pontos geradas no entorno das estações de radiodifusão licenciadas.

O algoritmo proposto para determinação do movimento do VANT, baseado na analogia de forças de campo, demonstrou apresentar soluções eficientes na geração de trajetória aos nós ao mesmo tempo em que permitiu a implementação de desvio em ambientes dotados de obstáculos horizontais, que requerem contorno horizontal, e verticais, que implicam em variação da altitude, estas definidas a partir de configurações associadas aos afastamentos mínimos desejados e amplitude máxima configurada ao VANT, dispensando a elaboração de restrições analíticas para esse fim.

Não obstante a simulação apresentar trajetórias que definem as coordenadas para o devido desvio dos obstáculos físicos ou regulamentares, uma terceira etapa de refinamento futura da trajetória poderá ser efetuada a partir de informações reais da dinâmica de voo de um determinado VANT comercial que considere, por exemplo, o raio mínimo da trajetória em função da velocidade para mudança de direção de modo a evitar a ocorrência da perda de sustentação (estol), aliado a sistemas de supervisão de missão e segurança de voo.

Embora não utilizado na simulação, o modelo de forças permite a definição de trajetórias mais retilíneas, adequadas aos VANT do tipo multirrotor, que não possuem asa, por meio do aumento do valor do coeficiente de força de atração do modelo selecionado. Quanto maior o coeficiente de força, maior a atração entre o ponto de destino e o VANT e mais retilíneas serão as trajetórias, provocando redução do comprimento em relação ao traçado simulado para asa fixa.

Além disso, por se tratar de etapa inicial de desenvolvimento, implementações futuras que envolvam algoritmos de aprendizagem de máquina embarcados podem auxiliar no ajuste dos modelos de propagação *on the fly* podem permitir que o próprio VANT ajuste as posições dos nós a serem visitados a partir da aprendizagem efetuada nas leituras precedentes, estimando novos pontos a partir dos parâmetros previamente conhecidos das estações autorizadas e do comportamento da propagação no contexto de prova.

No mesmo sentido, assim como há significativa variedade de funções de ativação no âmbito das redes neurais artificiais, funções de força diversas podem ser implementadas tanto para atração quanto para repulsão horizontal e desvio vertical, assim como técnicas de otimização podem ser aplicadas parcialmente, por exemplo, para definir qual é a taxa ótima de subida e descida quando da realização de desvios verticais sobre obstáculos extensos, como as linhas de transmissão, bem como considerações de direção e intensidade variáveis do vento ao longo das regiões visitadas, auxiliando em aperfeiçoamento da previsão de gasto energético.

Apesar das limitações regulamentares atuais da operação do VANT de forma autônoma do Brasil, ou mesmo em relação às exigências na operação telecontrolada, a proposta se alinha às práticas de monitoramento que vem crescendo ao longo do planeta, sugerindo o investimento em instrumentos e meios capazes de realizar registros em grandes áreas geográficas de forma abrangente, rápida, multiparametral, em um país dotado de fronteiras extensas e grandes áreas com baixa densidade populacional, propícias a atividades clandestinas.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE TELECOMUNICAÇÕES. Resolução Anatel nº 772, de 16 de janeiro de 2025. **Aprova o Plano de Atribuição, Destinação e Distribuição de Faixas de Frequências no Brasil - PDFF, promovendo as atribuições, destinações e condições específicas de uso de faixas de frequências nele dispostas.** Publicado no DOU de 22/01/2025, retificado em 22/04/2025. Brasília, DF, 2025. Disponível em: <https://informacoes.anatel.gov.br/legislacao/resolucoes/2025/2001-resolucao-772>. Acesso em: 03 out. 2025.

AHMAD, Ali Haidar; ZAHWE, Oussama; NASSER, Abbass; CLEMENT, Benoit. **Path Planning for Unmanned Aerial Vehicles in Dynamic Environments: A Novel Approach Using Improved A * and Grey Wolf Optimizer.** *In: World Electric Vehicle Journal*, 2024, v. 15, 531. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2032-6653/15/11/531>. Acesso em: 24 ago. 2025.

AKANNI, A. O.; OLISELOKE, A. N. **Validation of Egli Model and Estimation of Pathloss Exponent of a Radio Signal at VHF Band in Hilly Terrain.** *In: International Journal of Research and Innovation in Applied Science (IJRIAS)*, 2020, v. 5, n. 9. Disponível em: <https://rsisinternational.org/journals/ijrias/DigitalLibrary/Vol.5&Issue9/95-100.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2025.

AMARAL, L. R. d.; ZERBATO, C.; FREITAS, R. G. d.; BARBOSA JUNIOR, M. R.; SIMOES, I. O. P. d. S. (2020). **VANT applications in agriculture 4.0.** *In: Revista Ciência Agronômica*, 51(spe): e20207748. ISSN 1806-6690. URL <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20200091>

ARANTES, Jesimar da Siva. **Sistema autônomo para supervisão de missão e segurança de voo em VANTs.** Orientador: Prof. Dr. Claudio Fabiano Motta Toledo. Tese (Doutorado em Ciências de Computação e Matemática Computacional) – Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação – ICMC, Universidade de São Paulo, 2019. Disponível em: https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/55/55134/tde-10102019-091702/publico/JesimarArantes_revisada.pdf. Acesso em: 12 dez. 2025.

ARORA, S. **Polynomial Time Approximation Schemes for Euclidean TSP and Other Geometric Problems.** 1998. *In: Journal of the ACM*, v. 45, n. 5, p. 753-782. Disponível em: <https://dl.acm.org/doi/10.1145/290179.290180>. Acesso em: 24 jul. 2025.

ÁVILA, Marcos Eduardo. **Transmissor apreendidos em estações de radiodifusão clandestinas (Rádio Piratas) - Aspectos periciais e forenses.** Orientador: Prof. Dr. Pedro Luís Próspero Sanchez. São Paulo: SP, 2012. Dissertação (Mestrado em Sistemas Eletrônicos). 105 f. Disponível em https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3142/tde-27052013-120054/publico/Diss_Marcos_Avila.pdf. Acesso em: 01 ago. de 2025.

BEAL, Logan D.R; HILL, D.; MARTIN, R. Abraham.; HEDENGREN, John. D. **GEKKO Optimization Suite**, Processes, v. 6, n. 8, 2018. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9717/6/8/106>. Acesso em: 03 mar. 2024.

BORGHOFF, J.; KNUDSEN, L.R.; MATUSIEWICZ, K. **Hill Climbing Algorithms and Trivium.** *In: Biryukov, A., Gong, G., Stinson, D.R. (eds) Selected Areas in Cryptography. SAC. Lecture Notes in Computer Science*, v. 6544, Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-19574-7_4. Acesso em: 24 set. 2025.

BRASIL. Lei nº 9.472, de 16 de julho de 1997. **Dispõe sobre a organização dos serviços de telecomunicações, a criação e funcionamento de um órgão regulador e outros aspectos institucionais, nos termos da Emenda Constitucional nº 8, de 1995.** Diário Oficial da União, Brasília, 17 jul. 1997. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil03/leis/19472.htm>. Acesso em: 07 out. 2022.

CARLSON, A.; Bruce; CRILLY Paul B. **Communication systems**. 4. ed. New York: McGraw Hill, 2010. 954 p.

CASANA, J.; LAUGIER, E. J.; HILL, A. C.; REESE, K. M.; FERWERDA, C.; MCCOY, M. D.; LADEFOGED, T. **Exploring archaeological landscapes using drone-acquired lidar: Case studies from Hawaii, Colorado, and New Hampshire, USA.** *In: Journal of Archaeological Science: Reports*, 2021. Disponível em: linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S2352409X2100345X. Acesso em: 10 de ago. de 2025.

CRFS. **Why spectrum monitoring is critical for urban UTM operations.** Chantilly, VA, USA, [2024?]. Disponível em: <https://www.crfs.com/hubfs/Brochures/ISR%20capabilities%20with%20RF%20sensor%20payloads%20in%20VANTs.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

CRFS. **Strengthening isr capabilities with rf sensor payloads in unmanned aerial vehicles.** Chantilly, VA, USA, 2024. Disponível em: <https://www.crfs.com/hubfs/Brochures/ISR%20capabilities%20with%20RF%20sensor%20payloads%20in%20VANTs.pdf>. Acesso em: 27 ago. 2025.

DANTZIG, G.B.; FULKERSON, D.R.; JOHNSON, S.M. **Solution of a large-scale traveling salesman problem.** *In: Operations Research*, 1954, v. 2, p. 393–410. Disponível em: <https://www.rand.org/content/dam/rand/pubs/papers/2014/P510.pdf>. Acesso em: 11 jun 2025.

DECEA. **Aeronaves não tripuladas e o acesso ao espaço aéreo brasileiro.** ICA 100-40. Brasília, DF: 2023. Portaria DECEA nº 928/DNOR8, de 15 de maio de 2023. Publicada no BCA nº 103 de 06 de junho de 2023. Disponível em: <https://publicacoes.decea.mil.br/publicacao/ica-100-40>. Acesso em: 25 jul. 2025.

DENG, Z.; WU, F.; XU, Y.; YANG, D.; XIAO, L. **Energy minimization for radio map-based VANT pickup and delivery logistics system.** *In: IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2024, v. 73, p. 17893–17898. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10603397>. Acesso em: 19 nov. 2025.

DI FRANCO, C.; BUTTAZO, G. **Energy-Aware Coverage Path Planning of VANTs.** *In: IEEE International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions*, 2015, Vila Real, Portugal, 2015, p. 111-117. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/7101619>. Acesso em: 03 ago. 2025.

EBRAHIMI, D; SHARAFEDDINE, S.; HO, P.-H.; ASSI, C. **Autonomous VANT trajectory for localizing ground objects: a reinforcement learning approach.** *In: IEEE Trans. Mob. Comput.* 20(4), 2020, p. 1312–1324. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8960453>. Acesso em: 19 nov. 2025.

EOM S., LEE H., PARK J., LEE I. **VANT-aided wireless communication design with propulsion energy constraint**. In: IEEE International Conference on Communications (ICC), 2018, v. 16, n. 6, p. 3747–3760. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8422583>. Acesso em: 07 jul. 2025.

HA, I.-k. **Improved A-Star Search Algorithm for Probabilistic Air Pollution Detection Using VANTs. Sensors**. In: Recent Advances in VANTs' GN&C (Guidance, Navigation, and Control) Technologies, v. 24, n. 4, 1141. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/24/4/1141>. Acesso em: 22 out. 2025.

HEDENGREN, J.; MOJICA, J.; COLE, W.; EDGAR, T. **APOPT: MINLP Solver for Differential and Algebraic Systems with Benchmark Testing**. In Proceedings of the INFORMS National Meeting, Phoenix, AZ, USA, 14–17 out. 2012.

HELD, M.; KARP, R. **A Dynamic Programming Approach to Sequencing**. In: Journal for the Society for Industrial and Applied Mathematics, 1962, v. 10, p. 1-10. Disponível em: <https://pubs.siam.org/doi/10.1137/0110015>. Acesso em: 03 jun 2025.

HERNANDO, L.; MENDIBURU, A.; LOZANO, J. A. **Hill-Climbing Algorithm: Let's Go for a Walk Before Finding the Optimum**. In: IEEE Congress on Evolutionary Computation (CEC), Rio de Janeiro, Brasil, 2018, p. 1-7. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8477836>. Acesso em: 14 jul 2025.

HINDUMATHI V.; PRASANNA K.; DIVYA G.; BHAVANI B. D.; KAVERI B. **VANT Path Planning**. International Conference on Emerging Technologies in Engineering Applications (ICETEA), Puducherry, India, 2025, p. 1-6, doi: 10.1109/ICETEA64585.2025.11099735.

ITU. **Spectrum Monitoring Handbook**. Genebra, 2011a. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/hdb/R-HDB-23-2011-PDF-E.pdf. Acesso em: 28 jun. 2025.

ITU. Recommendation ITU-R SM.1723-2: **Mobile spectrum monitoring unit**. Genebra, 2011b. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/sm/R-REC-SM.1723-2-201109-I!!PDF-E.pdf. Acesso em: 28 jun. 2025.

ITU. **Direction Finding**. Spectrum Management Training Program, 2020. Disponível em: <https://www.itu.int/en/ITU-D/Regional-resence/ArabStates/Documents/events/2020/SM/Pres/S2D2Direction%20Finding%20Basics%20and%20Methods.pdf>. Acesso em: 29 jul. 2025.

ITU. **Calculation of Free-Space Attenuation. Recommendation P.525-5**, Genebra, 2025, publicação eletrônica. Disponível em: https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/p/R-REC-P.525-5-202411-I!!PDF-E.pdf. Acesso em: 15 ago. 2025.

LASHARI, H. N.; ALI, H. M.; MASSAN, S.-U.-R. **Applications of unmanned aerial vehicles: a review**. In: 3C Tecnología. Edición Especial, nov. 2019. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/336847887_Applications_of_unmanned_aerial_vehicles_a_review. Acesso em: 24 jul 2025.

LU, H.; ZHEN, Y.; HAO, M.; **Nonlinear Autopilot Design for Fixed-Wing VANT Using Disturbance Observer Based Backstepping**. Chinese Automation Congress (CAC), Shanghai, China, 2020, pp. 4423-4428, doi: 10.1109/CAC51589.2020.9326591. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9326591/>. Acesso em: 22 maio 2025.

MATAI, R.; SINGH, S.; LAL, M. **Traveling Salesman Problem: an Overview of Applications, Formulations, and Solution Approaches, Traveling Salesman Problem, Theory and Applications**. In: InTech, Nov. 30, 2010. doi: 10.5772/12909. Disponível em: <https://www.intechopen.com/chapters/12736>. Acesso em: 15 jul 2025.

MILLER Gary M. **Modern electronic communication**. Upper Saddle River, N.J: Pearson/Prentice Hall. 2005, 8. ed., 923 p.

MOTLAGH, N. H.; KORTOCI, P.; SU, X.; LOVÉN, L.; HOEL, H.; HAUGSVÆR, S.; SRIVASTAVA, V.; GUL, Brandsen, C.; NURMI, P.; TARKOMA, S. **Unmanned aerial vehicles for air pollution monitoring: A survey**. In: IEEE Internet of Things Journal, 2023, v. 10. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10167736>. Acesso em: 21 jun. 2025.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Prentice Hall, 2010.

SALIH, A.; ZAINI, N.; ZHAHIR, A. **The Suitability of GPS Receivers Update Rates for Navigation Applications**. In: World Academy of Science, Engineering and Technology, Open Science Index 78, International Journal of Aerospace and Mechanical Engineering, v. 7, n. 6, 2013, p. 1012 - 1019. Disponível em: <https://publications.waset.org/7783/the-suitability-of-gps-receivers-update-rates-for-navigation-applications>. Acesso em: 10 maio 2025.

SANTOS, Marcelo de Souza. **Ciclos Hamiltonianos em Grafos**. In: Ciência e Natura. Revista do Centro de Ciências Naturais e Exatas – UFSM, 2017, v.39 n.3, p. 595 –626. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaenatura/article/download/24502/pdf/143412>. Acesso em: 20 jul 2025.

SCHMIDT, S.; SARACENI, A. **Consumer acceptance of drone-based technology for last mile delivery**. In: Research in Transportation Economics, 2024, v. 103. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0739885923001440>. Acesso em: 24 jul 2025.

SCHWARTZ, Mischa. **Transmissão de informação, modulação e ruído**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Dois, 1979. 580 p.

SHARMA G., JAIN S., SHARMA R. S., **Path Planning for Fully Autonomous VANTs-A Taxonomic Review and Future Perspectives**. In: IEEE Access, v. 13, p. 13356-13379, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3529754. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/10840190>. Acesso em: 24 jul. 2025.

SOLOMON, M. **Algorithms for the Vehicle Routing and Scheduling Problem with time Window Constraints**. *Operations Research*, 35, p. 254-265. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1287/opre.35.2.254>. Acesso em: 13 jul. 2025.

TORIUMI, F. Y.; BITTENCOURT, T. N.; FUTAI, M. M. **VANT-based inspection of bridge and tunnel structures: an application review.** *In: Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 2023, v. 16. ISSN 1983-4195. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/riem/a/9GzKyCrtfbMGkVRWZQBGRr/?format=html&lang=en>. Acesso em: 16 jul 2025.

WINNF. **Overview of the Use of Drones for Spectrum Monitoring Applications.** Estados Unidos, 2021. Disponível em: https://www.wirelessinnovation.org/assets/work_products/Reports/WINNF-TR-2009-V1.0.0%20Drones%20for%20Spectrum%20Monitoring.pdf. Acesso em: 05 jul. 2025.

WILLIS, Andrew; FESHAMI, Braden; VASAN, Srini; TOUMA, Jimmy. **An RF Direction Finding Payload for VANTs with Deep Learning Direction Prediction Via Resnet.** *In: International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2025, p. 67-74. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/11007847>. Acesso em: 24 set. 2025.

WU, Jiehong; SUN, Ya'nan; LI, Danyang; SHI, Junling; LI, Xianwei; GAO, Lijun. **An Adaptive Conversion Speed Q-Learning Algorithm for Search and Rescue VANT Path Planning in Unknown Environments.** *In: IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 72, n. 12, p. 15391-15404, dez. 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3297837.

YE, W.; WU, W.; WU, SHAN, F.; YANG, M.; LUO, J. **Energy-efficient Trajectory Planning and Speed Scheduling for VANT-assisted Data Collection.** *In: 16th International Conference on Mobility, Sensing and Networking (MSN)*, Tokyo, Japan, 2020, p. 190-197, doi: 10.1109/MSN50589.2020.00043. <https://ieeexplore.ieee.org/document/9394281>

YI, J.; YANG, G.; ZHANG, Z.; TANG, Z. **An improved elastic net method for travelling salesman problem, Neurocomputing.** *In: Neurocomputing*, v. 72, n. 4-6, jan 2009, p. 1329-1335, ISSN 0925-2312

ZHAN C., ZENG Y. **Aerial-Ground cost tradeoff for multi-VANT-enabled data collection in wireless sensor networks.** *In: IEEE Transactions on Communications*, 2020, v. 68, n. 3, 1937–1950 p., 2020. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/document/8943326>. Acesso em: 24 jun. 2025.

ZHOU, X.; SHI, G.; ZHANG, J. **Improved Grey Wolf Algorithm: A Method for VANT Path Planning. Drones.** *In: Autonomous Flight of Drone: Control, Trajectory Optimization and Mission Planning*. 2 ed., 2024, v. 8, n. 11. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2504-446X/8/11/675>. Acesso em: 22 out. 2025.

ZUO, R.; WANG, Z.; BASTIDAS, C. E. C.; GURSOY, M. C.; SOLOMON, A.; QIU, Q. **A predictive control framework for uas trajectory planning considering 4g/5g communication link quality.** *In: Integrated Communication, Navigation and Surveillance Conference (ICNS)*, 2023. p. 1–10.

APÊNDICE A - OTIMIZAÇÃO COM APOPT

Abaixo os resultados obtidos do procedimento de otimização com a suíte de otimização Gekko, desenvolvida por Beal *et. at.* (2018), fazendo uso do *solver* APOPT. Ao otimizador foi encaminhada a matriz de arestas contendo os valores dos comprimentos entre cada nó, considerando cada nó como uma estação, em representação à configuração da Etapa A. Além disso, foram modeladas as restrições propostas por Dantzig, Fulkerson e Johnson (1954). Os resultados estão apresentados na Listagem 1.

Listagem 1 – Resultado da solver na Etapa A

```

-----
APMonitor, Version 1.0.3
APMonitor Optimization Suite
-----

```

```

----- APM Model Size -----

```

```
Each time step contains
```

```

Objects   : 0
Constants : 0
Variables : 244
Intermediates: 1
Connections : 0
Equations  : 101
Residuals  : 100

```

```
Number of state variables: 243
```

```
Number of total equations: - 99
```

```
Number of slack variables: - 81
```

```
-----
Degrees of freedom      : 63
```

```
-----
Steady State Optimization with APOPT Solver
-----
```

```

Iter:  1 I: 0 Tm:  0.03 NLPi:  3 Dpth:  0 Lvs:  3 Obj: 4.17E+02 Gap:  NaN
Iter:  2 I: -1 Tm:  0.00 NLPi:  1 Dpth:  1 Lvs:  2 Obj: 4.17E+02 Gap:  NaN
Iter:  3 I: -1 Tm:  0.01 NLPi:  2 Dpth:  1 Lvs:  1 Obj: 4.17E+02 Gap:  NaN
Iter:  4 I:  0 Tm:  0.00 NLPi:  3 Dpth:  1 Lvs:  3 Obj: 4.94E+02 Gap:  NaN
Iter:  5 I: -1 Tm:  0.00 NLPi:  1 Dpth:  2 Lvs:  2 Obj: 4.94E+02 Gap:  NaN
[...]
Iter: 200 I: -1 Tm:  0.00 NLPi:  1 Dpth: 12 Lvs: 86 Obj: 8.87E+02 Gap: 1.67E-02
Iter: 201 I: -1 Tm:  0.01 NLPi:  1 Dpth: 12 Lvs: 85 Obj: 8.87E+02 Gap: 1.67E-02
Iter: 202 I:  0 Tm:  0.01 NLPi:  3 Dpth: 12 Lvs: 84 Obj: 9.35E+02 Gap: 1.67E-02
Iter: 203 I: -1 Tm:  0.00 NLPi:  1 Dpth: 12 Lvs: 83 Obj: 8.88E+02 Gap: 1.67E-02
Iter: 204 I: -1 Tm:  0.00 NLPi:  1 Dpth: 12 Lvs: 82 Obj: 8.88E+02 Gap: 1.67E-02
--Integer Solution: 8.89E+02 Lowest Leaf: 8.88E+02 Gap: 1.02E-03
Iter: 205 I:  0 Tm:  0.01 NLPi:  2 Dpth: 12 Lvs: 82 Obj: 8.89E+02 Gap: 1.02E-03
Successful solution
-----

```

```

Solver      : APOPT (v1.0)
Solution time : 1.3675 sec
Objective    : 889.0807085434363
Successful solution
-----

```

Matriz X final:

```

[[[0.0] [1.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0]]
[[0.0] [0.0] [1.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0]]
[[0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [1.0] [0.0]]
[[0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [1.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0]]
[[0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [1.0] [0.0] [0.0] [0.0]]
[[0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [1.0] [0.0] [0.0]]
[[1.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0]]
[[0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [1.0]]
[[0.0] [0.0] [0.0] [1.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0] [0.0]]]
Comprimento final (km): [889.08070854]

```

Fonte: produzido pelo autor (2025)

O resultado “X final:” expressa a matriz de variáveis inteiras que servem de valores de decisão quanto ao percurso de determinado trecho entre os nós i, j . As estações j , representadas pelas colunas, são os nós de origem e as estações i , representadas pelas linhas, são os nós de destino. A partir da base na Anatel, índice (0, 0), localiza-se o destino, no caso, (6, 0). Desloca-se até a coluna (0, 6) e se localiza o próximo destino, até o ciclo retornar à base na Anatel no índice (0, x), onde x representa o último nó fiscalizado.

A partir da sequência obtida, foi preparado o arquivo contendo os dados técnicos das estações e fórmulas do modelo de perdas de propagação e distâncias de haversine. Em seguida foi executado novamente o solver APOPT. Os resultados estão apresentados na Listagem 2.

Listagem 2 - Resultado da solver na Etapa B

```

-----
APMonitor, Version 1.0.3
APMonitor Optimization Suite
-----

```

----- APM Model Size -----

Each time step contains

```

Objects      : 0
Constants    : 0
Variables    : 56
Intermediates: 1
Connections  : 0
Equations    : 18
Residuals    : 17

```

Number of state variables: 52
 Number of total equations: - 16
 Number of slack variables: - 16

 Degrees of freedom : 20

 Steady State Optimization with APOPT Solver

Iter	Objective	Convergence
0	3.09767E+05	7.25799E+00
1	5.22628E+06	2.79684E-01
2	3.79809E+06	2.51288E-01
3	2.87142E+03	7.25799E+00
4	8.29446E+02	8.19278E-02
5	7.30315E+02	5.12472E-01
6	6.80814E+02	1.77834E-02
7	6.36114E+02	4.21804E-03
8	6.81041E+02	3.63223E-02
9	6.31910E+02	6.53731E-03

Iter	Objective	Convergence
10	7.17260E+02	1.10596E-03
11	6.22019E+02	7.11124E-01
12	6.17370E+02	2.97126E-03
13	6.17583E+02	1.91218E-02
14	6.16671E+02	4.28105E-04
15	6.15586E+02	3.37632E-05
16	6.15670E+02	2.61626E-04
17	6.15675E+02	4.91733E-06
18	6.15665E+02	1.00994E-06
19	6.15665E+02	6.80973E-08

Iter	Objective	Convergence
20	6.15664E+02	3.87343E-07
21	6.15665E+02	1.31775E-07
22	6.15663E+02	1.08549E-07
23	6.15663E+02	1.08549E-07

Successful solution

 Solver : APOPT (v1.0)
 Solution time : 0.028099999999999986 sec
 Objective : 615.6626763140605
 Successful solution

Coords finais:

```

[[[-2.53454528] [-44.29104766]]
 [[-2.551680457] [-44.969549598]]
 [[-3.4961901683] [-44.945130515]]
 [[-3.95714517] [-44.556653751]]
 [[-4.294125331] [-43.915296377]]
 [[-4.479465606] [-43.561567251]]
 [[-3.7680597833] [-43.491761308]]
 [[-3.033150296] [-43.968109339]]
 [[-2.6587383567] [-44.210696083]]
 [[-2.53454528] [-44.29104766]]]
Comprimento final (km): [615.66267631]

```

Fonte: produzido pelo autor (2025)

A seguir está apresentado o código do modelamento contendo restrições de radiofrequência realizado em na linguagem Python, seguindo a sintaxe e funções específicas do Gekko, conforme Listagem 3.

Listagem 3 – Código do modelamento para a Etapa A

```

from gekko import GEKKO
import numpy as np

#inicialização do modelo
m = GEKKO(remote = False)
#help(m)

#carregamento dos valores das arestas

Arestas = np.loadtxt("distancias_entre_estacoes.csv", delimiter=" ")
#demandas = m.Array(m.Param)

x = np.zeros(Arestas.shape)
linsX, colsX = x.shape[0], x.shape[1]

x = m.Array(m.Var, (linsX, colsX), integer = True)

for i in range(0,linsX):
    for j in range(0,colsX):
        x[i,j] = m.Var(value=1,lb=0,ub=1,integer=True)

for i in range(linsX): # restrições
    m.Equation(np.sum(x[i,:])==1)
    m.Equation(np.sum(x[:,i])==1)
    for j in range(colsX):
        m.Equation(x[i,j] + x[j,i] <= 1)

comprimento = 0
for i in range(linsX):
    for j in range(colsX):
        comprimento = comprimento + Arestas[i,j] * x[j,i]

```

```

k = m.Intermediate(comprimento)

m.options.IMODE = 1 #otimizacao estacionaria
m.options.SOLVER = 1 #1 para APOPT; 2 para BPOPT; 3 para IPOPT
m.Minimize(k)
m.solve(dispatch=True)

print("Matriz X final: \n",x)
print("Comprimento final (km): ", k.value)

```

Fonte: produzido pelo autor (2025)

Por fim, a codificação da Etapa B está apresentada na Listagem 4.

```

from gekko import GEKKO
import numpy as np

m = GEKKO(remote = False)

def calcRadioHorizon(hStations, hAntenas, hVant): #calcula o horizonte de rádio
entre estações e o VANT
    hStations = np.array(hStations)
    hAntenas = np.array(hAntenas)
    hSistem = np.add(hAntenas, hStations)
    return np.multiply(np.add(np.sqrt(hSistem), np.sqrt(hVant)), 4.124)

def distancias(pos1, pos0): #distancias entre pontos e estações / atualizada para
haversine
    piFactor = 3.141592653/180
    noE = np.array(pos0)
    noD = np.array(pos1)
    noE = piFactor * pos0
    if noE.ndim == 1:
        noE = np.reshape(noE, (int(noE.shape[0]/2), 2))
    noD = piFactor * pos1
    if noD.ndim == 1:
        noD = np.reshape(noD, (int(noD.shape[0]/2), 2))
    #subt = np.subtract(noE, noD) #subt tem a diferença de latitudes no primeiro
termo e a long. no segundo.
    subt = noE - noD #subt tem a diferença de latitudes no primeiro termo e a long.
no segundo.
    parc1 = m.sin(subt[0,0]*0.5)**2
    A = subt[0,1]*0.5
    parc2 = (m.sin(A)**2) * m.cos(noD[0,0])
    parc2 = parc2 * m.cos(noE[0,0])
    parcT = m.sqrt(parc1 + parc2)
    dHaversine = m.asin(parcT) * (2 * 6378.137)
    return dHaversine

```

```

def calcSIRDroneSeletivo(posDroneAtu, posEstacoes, ganhoR, noiseR, hRadio,
hDrone, propModel): #estacao_i é a enésima estação da sequência
    posDroneAtu = np.array(posDroneAtu)
    posDroneAtu = np.reshape(posDroneAtu, (1,2))
    hRadio = np.array(hRadio)
    estacoesT = np.array((posEstacoes[0], posEstacoes[1]))
    cordas = distancias(posDroneAtu, estacoesT) * 1000
    freqT = np.array(posEstacoes[(2)].copy())
    ganhoAbsT = np.array(posEstacoes[(3)].copy())
    alturaT = np.array(posEstacoes[(4)].copy())
    potT = np.array(posEstacoes[(5)].copy()) * 1000
    terrenoT = np.array(posEstacoes[(6)].copy())
    num_estacaoT = np.array(posEstacoes[(7)].copy())
    if propModel == 1: #Elgi
        cordas = np.power(cordas, 2) #eleva as distâncias ao quadrado
        parc1 = np.multiply(np.array(ganhoAbsT * ganhoR), potT) #Gt x Gr x Pt
        alturaT = np.array(alturaT) * hDrone #ht x hr, hr = 30 metros do drone
        parc2 = np.array(np.power(np.divide(alturaT,cordas),2))
        parc3 = np.power(np.divide(1,freqT),2) * (1600) # 1600 = 40**2
        potencia_rec = np.multiply(parc1, np.multiply(parc2, parc3))
    elif propModel == 2: #Free-space-prop
        lambda2 = 299.792458*(1/freqT)
        parc1 = np.multiply(np.array(ganhoAbsT * ganhoR), lambda2) #Gt x Gr x Pt
        parc2 = 157.9136703581*np.power(cordas,2) #podemos multiplicar essa
        parcela por L, perdas do sistema
        potencia_rec = np.multiply(np.divide(parc1, parc2), potT)
        potencia_rec = 10*m.log10(potencia_rec/0.001)
        SIRDrone = potencia_rec - noiseR
    return SIRDrone

```

Arquivos contendo os dados das estações seguindo a sequência obtida na Etapa

A.

```

estacoes = np.loadtxt("localizacao_estacoes_gekko.csv", delimiter=" ")
nohs = np.loadtxt("localizacao_estacoes_gekko.csv", delimiter=" ")
dadosEstacoes = genfromtxt("dados_estacoes_gekko.csv", delimiter=",")
h_antena = dadosEstacoes[:, 4].copy()
nohs = np.append(nohs, nohs[0,:])
nohs = np.reshape(nohs, (int(nohs.shape[0]/2), 2))
limSNR = 73.1 # Limiar da relação Sinal-Ruído em dB
linsNohs, colsNohs = nohs.shape[0], nohs.shape[1]
modPropagacao = 2 # FSPropagation
h_drone = 30 # 30 metros
noisePiso = -120 # piso de ruído em dBm
ganhoDrone = 1
coords = m.Array(m.Var, (linsNohs, colsNohs), integer = False)
horizRadio = np.zeros((linsNohs-1))

```

```

for i in range(0,linsNohs): # fixa a matriz de decisão obtida na Etapa A
    if i != 0 and i != linsNohs-1: # define as coordenadas variaveis das estações

```

```

        coords[i,0] = m.Var(value=nohs[i,0]+0.000001,lb=-10,ub=0,integer=False) #
        limiares de latitude para o Maranhão
        coords[i,1] = m.Var(value=nohs[i,1]+0.000001,lb=-49,ub=-41,integer=False)
        # limiares de longitude para o Maranhão
        horizRadio[i-1] = calcRadioHorizon(0, h_antena[i-1], h_drone) #0 metros
        altura terreno, 30 metros altura vant
        else: # fixa as coordenadas da Anatel, base do VANT
            coords[i,0] = m.Param(value=nohs[i,0])
            coords[i,1] = m.Param(value=nohs[i,1])

    for i in range(1, linsNohs-1): # restrições
        m.Equation(calcSIRDroneSeletivo(coords[i,:], dadosEstacoes[i-1,:],
        ganhoDrone, noisePiso, horizRadio[i-1], h_drone, modPropagacao)>=limSNR)
        m.Equation(calcSIRDroneSeletivo(coords[i,:], dadosEstacoes[i-1,:],
        ganhoDrone, noisePiso, horizRadio[i-1], h_drone, modPropagacao)<=85)
        m.Equation(distancias(nohs[i,:], coords[i,:]) <= horizRadio[i-1])

    distAtualiz = 0
    piFactor = 3.141592653/180
    for i in range(1, linsNohs): # cálculo das distâncias entre as coordenadas
        distAtualiz = distAtualiz + distancias(coords[i,:], coords[i-1,:])

    comprimento = m.Intermediate(distAtualiz)

    #m.options.IMODE = 1 #otimizacao estacionaria
    m.options.SOLVER = 1 #1 para APOPT; 2 para BPOPT; 3 para IPOPT
    m.options.CSV_WRITE=2
    m.Minimize(comprimento)
    m.solve()

    print("Coords finais: \n",coords)
    print("Comprimento final (km): ", comprimento.value)

```

Fonte: produzido pelo autor (2025)

Em função de problemas de arredondamento entre as coordenadas obtidas na otimização pelo *solver* e os cálculos efetuados no simulador, as coordenadas no solver foram obtidas a partir de restrição de SNR em 73,1 dB.