

ALVARO ROGÉRIO CANTIERI

**Método Colaborativo para Posicionamento de Precisão usando VANT e VTNT
para a Inspeção Detalhada de Torres de Distribuição de Energia Elétrica.**

TESE

CURITIBA

2020

ALVARO ROGÉRIO CANTIERI

**Método Colaborativo para Posicionamento de Precisão usando VANT e VTNT
para a Inspeção Detalhada de Torres de Distribuição de Energia Elétrica.**

**Collaborative Method for Precise Positioning using UAV and UGV for Detailed
Inspection of Electrical Distribution Power Pylon**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), como requisito parcial para obtenção do título de “Doutor em Ciências” - Área de Concentração: Engenharia de Computação.
Orientador: Prof. Dr. Marco Aurélio Wehrmeister.
Coorientador: Prof. Dr. André Schneider de Oliveira.

CURITIBA

2020



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.



ALVARO ROGERIO CANTIERI

**MÉTODO COLABORATIVO PARA POSICIONAMENTO DE PRECISÃO USANDO VANT E VTNT PARA A
INSPEÇÃO DETALHADA DE TORRES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

Trabalho de pesquisa de doutorado apresentado como requisito para obtenção do título de Doutor Em Ciências da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).
Área de concentração: Engenharia De Computação.

Data de aprovação: 15 de Dezembro de 2020

Prof Marco Aurelio Wehrmeister, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Andre Schneider De Oliveira, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Eduardo Todt, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Joao Alberto Fabro, Doutorado - Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof Jose Luis Sousa De Magalhaes Lima, Doutorado - Instituto Politécnico de Bragança

Prof Marlio Jose Do Couto Bonfim, Doutorado - Universidade Federal do Paraná (Ufpr)

Prof Paulo Roberto Ferreira Junior, Doutorado - Universidade Federal de Pelotas (Ufpel)

Documento gerado pelo Sistema Acadêmico da UTFPR a partir dos dados da Ata de Defesa em 26/02/2021.

Este trabalho teve apoio financeiro para aquisição dos materiais e equipamentos utilizados nas pesquisas através do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, juntamente com o Ministério da Educação – MEC por meio da chamada pública CNPq-SETEC/MEC No 17/2014 – Linha 4: Soluções Inovadoras, e da Fundação Araucária através do Convênio 337/2014 Chamada pública 24/2012. Teve também o apoio do Instituto Federal do Paraná, instituição à qual o autor dessa Tese é vinculado, através do edital de afastamento para pós-graduação docente.



MINISTÉRIO DA
EDUCAÇÃO



AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido sequer iniciado sem o apoio de diversas pessoas e entidades que devem ser lembradas aqui.

Aos meus orientadores, Professor Doutor Marco Aurélio Wehrmeister, e Professor Doutor André Schneider Oliveira, que compartilharam seu tempo e conhecimento para a construção deste trabalho, além de apontarem os caminhos quando tudo parecia obscuro.

Aos diversos mestres que compartilharam seus vastos conhecimentos de forma tão desapegada e plena, em muitos momentos sendo parceiros nos estudos realizados.

Aos colegas, que ombro a ombro construíram os alicerces de tudo o que apresentamos hoje nesta tese, especialmente aos colegas de laboratório Guido Berger, Marco Antônio e Matheus Ferraz, por todo o apoio e parceria no desenvolvimento dos estudos realizados.

À minha família, que me apoiou desde o início e em todos os momentos, em especial à minha mãe, que me proporcionou tudo nesta vida, inclusive meus estudos, minha esposa, Elisa Perez, uma presença firme e inabalável em todos os desafios enfrentados, minha filha Letícia Cantieri, que muitas vezes abdicou de seu tempo e necessidades pessoais para estar ao meu lado, e à minha filha Evangeline Cantieri que foi uma luz e uma alegria inestimáveis em diversos momentos difíceis. Deixo também um agradecimento especial ao meu cunhado e esposa, Rafael e Kharyn Perez, que gentilmente cederam o espaço de sua chácara para a realização dos testes de campo necessários à pesquisa.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, que me proporcionou a oportunidade desta formação única, e especialmente ao Laboratório de Engenharia de Sistemas Computacionais - LESC, aonde as pesquisas foram realizadas.

Deixo também um agradecimento especial à Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL, que através de seus profissionais, Engenheiro Carlos Henrique Arimatéia Rodrigues e Albari Sebastião Lejambre Jr, que apoiaram de forma importantíssima a realização dos experimentos e o levantamento de informações necessárias à pesquisa.

Finalmente, agradeço ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo apoio financeiro prestado ao projeto, sem o qual esta pesquisa não poderia ter sido realizada.

RESUMO

CANTIERI, Alvaro Cantieri. **Método Colaborativo para Posicionamento de Precisão usando VANT e VTNT para a Inspeção Detalhada de Torres de Distribuição de Energia Elétrica.** 2020. 99 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica e Informática Industrial) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

O processo de inspeção das condições estruturais de torres de distribuição de energia é uma tarefa obrigatória definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL no Brasil. Um aumento considerável na utilização de veículos autônomos para inspeção dessas estruturas vem sendo observado recentemente, entre eles os veículos aéreos não tripulados de pequeno porte (VANT's), devido às vantagens operacionais que eles apresentam. O desenvolvimento de arquiteturas de inspeção autônomas para este tipo de aplicação apresenta diversos desafios técnicos relacionados a execução segura e eficaz das tarefas relativas à operação, entre eles a detecção e desvio de obstáculos e o posicionamento de precisão dos veículos durante seu deslocamento. O objetivo principal deste trabalho é propor um método cooperativo de posicionamento entre um veículo aéreo não tripulado (VANT) e um veículo terrestre não tripulado (VTNT), baseado na utilização de uma etiqueta visual fixada no veículo de solo, para aplicação em tarefas de inspeção detalhada de torres e postes de distribuição de energia elétrica. Através desta proposta buscou-se desenvolver um método que permitisse aumentar a confiabilidade do deslocamento e seguimento de rotas de forma autônoma dos veículos durante o processo de inspeção, através da troca de informações de posicionamento relativo entre eles. Experimentos realizados para validar os dados de posição de voo do VANT utilizando-se da referência da etiqueta de solo apresentaram erros horizontal e vertical inferiores a 2,0 metros, considerando-se um intervalo de confiança para as medidas de 5%. No caso dos experimentos realizados para avaliar a navegação do veículo de solo através dos dados de posição gerados pelas imagens capturadas pelo VANT em voo, o erro final de posicionamento foi menor que 0,25 m para todas as rodadas, indicando a viabilidade de utilização do método de navegação cooperativa proposto em condições reais de aplicação.

Palavras-chave: Inspeção autônoma de torres de distribuição de energia. Sistemas de inspeção cooperativa. Sistemas cooperativos VANT/VTNT. Método de posicionamento cooperativo. Veículos autônomos para inspeção.

ABSTRACT

CANTIERI, Alvaro Cantieri. **Collaborative Method for Precise Positioning using UAV and UGV for Detailed Electrical Power Pylon Inspection**. 2020. 99 p. Thesis (PhD in Electrical and Computer Engineering) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2020.

The inspection process for the structural conditions of energy distribution pylons is a mandatory task defined by the National Electric Energy Agency - ANEEL in Brazil. A significant increase in the application of autonomous vehicles to inspect these structures is observed recently, including small unmanned aerial vehicles (UAVs), due to the operational advantages presented by these vehicles. The development of autonomous inspection architectures for this kind of application presents several technical challenges for the safe and effective performance of tasks related to the operation, including the obstacle detection and the precise positioning of vehicles during their displacement. The main objective of this work is to propose a cooperative method of positioning between an unmanned aerial vehicle (UAV) and an unmanned ground vehicle (UGV), based on a visual tag attached to the ground vehicle, for application in a detailed inspection of electricity distribution poles and pylons. This proposal sought to develop a method to increase the reliability of the autonomous displacement and route tracking from the vehicles during the inspection process, through the exchange of relative positioning information between them. Experiments performed to validate the UAV flight positioning data using the ground tag reference presents horizontal and vertical positioning errors lower than 2.0 meters, considering a confidence interval of 5 % for the measurements. The experiments executed to evaluate the navigation of the ground vehicle using the position data generated by the images captured by the UAV in flight, presented a positioning error lower than 0.25 m for all rounds, indicating the feasibility of using the cooperative navigation method proposed in real application conditions.

Keywords: Autonomous power pylom inspecion. Cooperative inspecion systems. Cooperative UAV/UGV systems. Cooperative positioning method. Autonomous inspection vehicles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Mapa atual da rede de distribuição de energia elétrica no Brasil. As cores das linhas representam o nível de tensão de transmissão. Ex: Amarelo: 138Kv; Verde 230Kv; Azul Claro: 345Kv; Vermelho: 500Kv; Azul Escuro: 600Kv. .	12
Figura 2 – Foto de um voo de inspeção demonstrando a proximidade do VANT em relação à torre e aos cabos de energia.	14
Figura 3 – Visão geral do sistema cooperativo de inspeção.	18
Figura 4 – Imagens de locais com impedimento de acesso à um veículo terrestre de inspeção.	19
Figura 5 – Imagens de local com acesso adequado para a operação do sistema proposto.	20
Figura 6 – a) Pioneer P3 com a AR-Tag posicionada em seu topo. b) Bebop drone com os sensores LIDAR Lite e Emild RTK-GPS embarcados.	39
Figura 7 – Foto do veículo aéreo montado e distribuição dos sensores.	40
Figura 8 – Especificações técnicas do sensor LIDAR Lite.	42
Figura 9 – Imagem do módulo RTK-GPS Emild Reach.	43
Figura 10 – Visão geral dos componentes do sistema RTK-GPS.	44
Figura 11 – Defeitos comuns encontrados nos componentes e estruturas das torres. . . .	50
Figura 12 – Parâmetros de voo autônomo para inspeção da torre com VANT.	52
Figura 13 – Correção de referências do sistema de posicionamento baseado na etiqueta visual.	55
Figura 14 – Descrição simplificada da arquitetura de troca de mensagens via ROS. . . .	56
Figura 15 – Trecho do código fonte mostrando os nós ROS.	57
Figura 16 – Trecho do código fonte do controle de orientação inicial.	58
Figura 17 – Primeira parte do código de controle de deslocamento.	59
Figura 18 – Segunda parte do código de controle de deslocamento.	59
Figura 19 – Erro absoluto e desvio padrão das medidas de distância do sensor LIDAR Lite em ambiente externo com iluminação solar indireta do alvo.	63
Figura 20 – Erro absoluto e desvio padrão das medidas de distância do sensor LIDAR Lite em ambiente externo com iluminação solar direta do alvo.	63
Figura 21 – Detalhe do local de testes com a instalação da antena do GPS-RTK.	64
Figura 22 – Captura de tela mostrando baixo número de satélites com nível adequado de sinal recebido para o funcionamento dos módulos RTK-GPS. Barras vermelhas: Potência de recepção abaixo do limiar aceitável. Barras verdes: Potência de recepção acima do limiar adequado.	66
Figura 23 – Gráficos de voo com captura de posição pelo RTK-GPS (Pontos verdes - GPS no modo Fix; Pontos amarelos - GPS no modo Float;). (a) voo com recepção em modo FIX durante todo o trajeto. (b)voo com recepção em modo FLOAT durante todo o trajeto. (c) voo com recepção no modo FLOAT causado por sombreamento da antena do VANT em uma área específica.	67
Figura 24 – Distância limite de detecção da ferramenta AR Track Alvar para quatro diferentes tamanhos de etiqueta com três resoluções de imagens capturadas.	73

Figura 25 – Figura mostrando capturas de tela de um voo realizado, evidenciando algumas situações específicas importantes. a) Imagem transmitida com erro , causando perda da acurácia; b) Operação regular da ferramenta; c) Etiqueta próxima ao limite de detecção; d) Sombreamento parcial da etiqueta causando perda de acurácia.	74
Figura 26 – Gráfico mostrando os dados de posicionamento adquiridos durante um voo. a), b) e c) Erros devido ao balanço da câmera na mudança de direção; d) Erro devido à perda de visibilidade da etiqueta.	77
Figura 27 – Avaliação das medidas de altura. (a) Erro absoluto da odometria do BeBop; (b) Erro absoluto da medida da etiqueta; (c) Comparação das medidas entre o <i>ground truth</i> , as medidas da etiqueta e as medidas de odometria do BeBop para um voo.	79
Figura 28 – Avaliação do erro de orientação para um voo. (a) Diferença entre medidas tomadas com a etiqueta e as medidas da odometria do BeBop. (b) Erro absoluto das medidas tomadas com a etiqueta em relação à odometria do BeBop.	80
Figura 29 – Arranjo experimental montado para teste do algoritmo de controle em ambiente interno com o VANT fixo.	82
Figura 30 – Gráfico do erro de posição final do deslocamento do VTNT em ambiente controlado.	83
Figura 31 – Visão geral da montagem do arranjo da experimentação externa do VTNT e seus componentes.	83
Figura 32 – Captura de telas das imagens de desloamento do VANT em experimento externo. 1) Início do deslocamento; 2) a 7) VTNT seguindo o VANT; 8) Final de deslocamento do VTNT abaixo do VANT.	84
Figura 33 – Erro absoluto de posição para os deslocamentos do VTNT no experimento externo.	84
Figura 34 – Erro absoluto de posição para os deslocamentos do VTNT no experimento externo.	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre os trabalhos que propõe arquiteturas de VANTs para aplicação em inspeções de sistemas de transmissão de energia	28
Tabela 2 – Comparação entre os trabalhos de algoritmos de posicionamento de VANTs por sistemas de visão e similares	32
Tabela 3 – Comparação entre as propostas que aplicam etiquetas visuais para posicionamento e navegação de VANTs	34
Tabela 4 – Comparação entre os trabalhos que propõe arquiteturas cooperativas entre VANT/VTNT para aplicação em inspeções de sistemas de transmissão de energia	37
Tabela 5 – Tabela de componentes dos VANT montado para os experimentos	39
Tabela 6 – Parâmetros técnicos definidos para a inspeção através do VANT	51
Tabela 7 – Tabela descrevendo as medidas de erro absoluto das leituras de posição horizontal, vertical e orientação, tomadas da etiqueta em ambiente externo à longas distâncias	71
Tabela 8 – Comparação do intervalo de confiança para as medidas de erro horizontal, vertical e de orientação, para uma distância de 10,0 m utilizando resoluções diferentes	72
Tabela 9 – Estatísticas dos erros de posição horizontal: AR-Track Alvar × Odometria do Bebop	75
Tabela 10 – Avaliação do erro absoluto de medidas de altura para todos os voos	79
Tabela 11 – Estatísticas das medidas de orientação obtidas da etiqueta para 10 voos	81

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	VISÃO GERAL DA INSPEÇÃO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	12
1.2	OBJETIVOS DO TRABALHO DE PESQUISA	19
1.3	JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES GERADAS PELO TRABALHO DE PESQUISA	21
1.4	PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE A PESQUISA EM ORDEM CRONOLÓGICA	22
1.5	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	24
2	REVISÃO DA LITERATURA	25
2.1	INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE VEÍCULOS NÃO TRIPULADOS	25
2.2	ARQUITETURAS ESPECÍFICAS DE VANTS PARA INSPEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	26
2.3	SISTEMAS DE CONTROLE DE NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA ATRAVÉS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E VISÃO COMPUTACIONAL	28
2.4	POSICIONAMENTO DE VANTS ATRAVÉS DE ETIQUETAS VISUAIS DE SOLO ("ARTIFICIAL TAGS")	31
2.5	SISTEMAS COLABORATIVOS ENTRE VANT E VTNT	34
2.6	DISCUSSÃO	36
3	DESCRIÇÃO DO FERRAMENTAL TÉCNICO E COMPUTACIONAL UTILIZADO NO DESENVOLVIMENTO	38
3.1	VEÍCULOS UTILIZADOS NO PROJETO	38
3.1.1	Avaliação das ferramentas utilizadas para referência de posição durante os experimentos de voo com o VANT	41
3.2	FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS APLICADAS NO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	44
3.3	DISCUSSÃO	46
4	DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS E ORGANIZAÇÃO METODOLÓGICA UTILIZADA NO TRABALHO	48
4.0.1	Análise da operação de inspeção e definições dos parâmetros do projeto	49
4.1	ORGANIZAÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO E INTEGRAÇÃO DAS FERRAMENTAS FÍSICAS E LÓGICAS NECESSÁRIAS AO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL	52
4.1.1	Definição e testes da arquitetura do sistema RTK-GPS	53
4.1.2	Sistema referencial utilizado no método de posicionamento cooperativo	53
4.1.3	Descrição da arquitetura de troca de informações via ROS	54
4.1.4	Descrição do sistema de controle autônomo do VTNT	57
4.2	PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE POSICIONAMENTO DE VOO DO VANT	59

4.3	PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE POSICIONAMENTO E NAVEGAÇÃO DO VTNT ATRAVÉS DE REALIMENTAÇÃO VISUAL	60
4.4	DISCUSSÃO	61
5	EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO	62
5.1	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SENSOR LIDAR NAS MEDIDAS REALIZADAS EM AMBIENTE EXTERNO NÃO CONTROLADO	62
5.2	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SOLUÇÃO DE RTK-GPS . . .	63
5.3	AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO DE POSICIONAMENTO DE VOO EXTERNO PARA O VANT UTILIZANDO-SE ETIQUETAS DE SOLO	68
5.3.1	Avaliação da acurácia de medidas de distância e orientação da ferramenta AR-Track Alvar em ambiente externo e a grandes distâncias	68
5.3.2	Distância limite de detecção para as etiquetas	72
5.3.3	Avaliação da acurácia das medidas de posicionamento horizontal em voo baseado na ferramenta AR-Tag Alvar	73
5.3.4	Análise da acurácia das medidas de posicionamento vertical em voo baseado na ferramenta AR-Tag Alvar	77
5.3.5	Acurácia das medidas de orientação em voo baseado na ferramenta AR-Tag Alvar	78
5.4	AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CONTROLE DO VEÍCULO TERRESTRE BASEADO NA REALIMENTAÇÃO VISUAL DADA PELO VANT	81
5.5	DISCUSSÃO	85
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	87
6.1	TRABALHOS FUTUROS	91
	REFERÊNCIAS	93

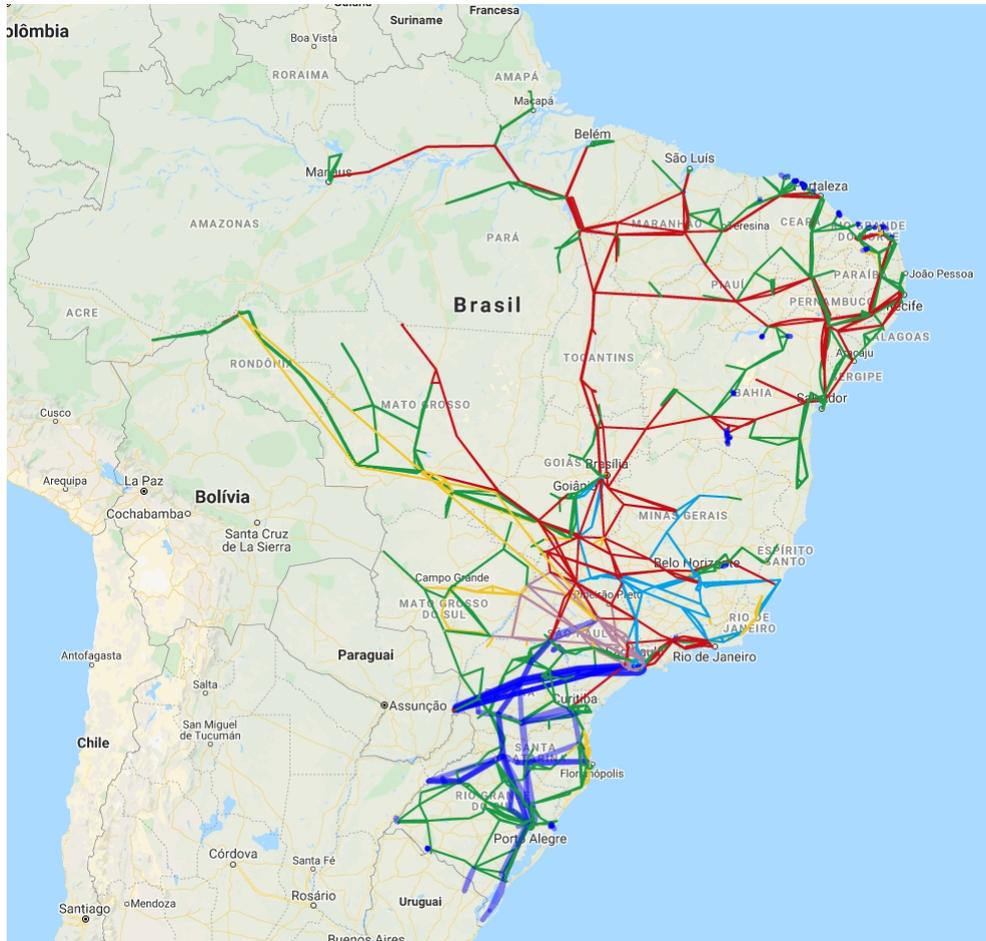
1 INTRODUÇÃO

A rede de geração e distribuição de energia elétrica no Brasil é constituída por um numero expressivo de conjuntos estruturais distribuídos por todo território nacional. A principal base de geração de energia é a hidroelétrica, o que traz a exigência do aproveitamento dos recursos hídricos onde eles estão disponíveis geograficamente, tornando a rede muito extensa. Novas bases de geração, como a eólica e a fotovoltaica têm trazido ainda maior capilaridade para essa infraestrutura. O sistema elétrico brasileiro segue atualmente um modelo de economia privada, baseado em um grande número de empresas que atuam nas três vertentes, geração, transmissão e distribuição. A responsabilidade da operação da distribuição de energia no país está a cargo do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), uma associação de direito privado sem fins lucrativos, que fica sob a regulação e fiscalização da Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL. A ANEEL publica resoluções que servem de base para a execução dos serviços e projetos executados pelas empresas fornecedoras e distribuidoras de energia.

A maior parte da transmissão e distribuição de energia é feita através de redes aéreas. Essas redes são compostas de longos trechos de torres de transmissão interligadas como circuitos a subestações de diversos níveis, que controlam o envio e a movimentação de energia por todo o território. De acordo com o o documento *Prospecção tecnológica no setor elétrico brasileiro* do Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (ANEEL, 2017) deverão ser instaladas no Brasil, até o ano de 2022, aproximadamente 21.503 km de novas linhas de transmissão. Dessa forma, a inspeção dos componentes das estruturas de transmissão é um ponto chave para a operação adequada do sistema, tornando-se inclusive um ponto estratégico para o desenvolvimento do país. A figura 1 mostra uma visão geral da rede de distribuição de energia no Brasil.

A manutenção preventiva da rede passa a ser um fator ainda mais crítico nesse caso, e abre toda uma área de pesquisa para novos sistemas de base tecnológica que sejam capazes de atender a demanda crescente de avaliações das condições da rede em intervalos menores de tempo e com menor necessidade de intervenção humana. Essa é uma das principais justificativas da proposição de pesquisas sobre sistemas de inspeção autônoma de redes de transmissão e distribuição de energia.

Figura 1 – Mapa atual da rede de distribuição de energia elétrica no Brasil. As cores das linhas representam o nível de tensão de transmissão. Ex: Amarelo: 138Kv; Verde 230Kv; Azul Claro: 345Kv; Vermelho: 500Kv; Azul Escuro: 600Kv.



Fonte: ONS (SISTEMA, 2020)

1.1 VISÃO GERAL DA INSPEÇÃO EM SISTEMAS DE TRANSMISSÃO E DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Os procedimentos utilizados na inspeção de sistemas de transmissão são definidos pelas empresas operadoras, baseados em normas definidas pela ANEEL. A agência não determina ações específicas para esta inspeção, mas dita normas gerais que servem de orientação para as empresas desenvolverem seus procedimentos internos e realizarem os relatórios técnicos, que devem ser enviados à agência periodicamente.

O documento *Plano Mínimo de Manutenção* (ANEEL, 2015) em seu texto "define as atividades mínimas de manutenção preditiva e preventiva e suas periodicidades para transformadores de potência e autotransformadores, reatores, capacitores, disjuntores, chaves seccionadoras, transformadores para instrumentos, para-raios e linhas de transmissão". Esse documento é base

para as empresas desenvolverem as metodologias e procedimentos aplicáveis ao tema. As inspeções das estruturas de transmissão e distribuição de energia realizadas pelas empresas são divididas em três tipos: as inspeções terrestres, as inspeções aéreas e as inspeções detalhadas.

As inspeções terrestres tradicionais são realizadas por técnicos que percorrem a linha de transmissão a pé, verificando o estado geral da linha de transmissão, a estabilidade das bases das estruturas quanto a erosões e desbarrancamentos, a situação dos estais, a situação dos aterramentos, a situação dos acessos até as estruturas, a proximidade da vegetação aos cabos, a presença de queimadas e de invasões da faixa de servidão.

As inspeções aéreas são realizadas através de aeronaves tripuladas (helicópteros) ou através de aeronaves não tripuladas (Veículos Aéreos Não Tripulados - VANTs). Nestas inspeções devem ser verificadas as integridades das linhas de transmissão e cabos para-raio, as cadeias de isoladores, a estabilidade das estruturas, a aproximação da vegetação aos cabos e a presença de queimadas nas proximidades das torres.

A partir dos resultados das inspeções terrestres e aéreas regulares deve ser avaliada a necessidade de inspeções detalhadas com escalada de estruturas, inspeções termográficas, inspeções noturnas para observação de centelhamento em isolamentos ou de inspeções específicas para identificação de defeitos. Devem ser observados nesse caso detalhes dos componentes e das estruturas, como oxidação de grelhas, estado de conservação dos parafusos de sustentação de cadeias, danos e defeitos em condutores internos, grampos de suspensão ou espaçadores, defeitos em isoladores, e qualquer tipo de desvio técnico que possa causar o mau funcionamento do sistema.

No seu modo tradicional, as inspeções detalhadas são realizadas pelos técnicos através da escalada das torres, para visualização dos detalhes, um processo demorado e perigoso. Nos últimos anos iniciou-se a utilização de aeronaves de pequeno porte telecomandadas do tipo multi-rotor, popularmente chamadas de "drones". Este tipo de aeronave permite a captura de imagens de ângulos que os técnicos não são capazes de obter na escalada, aumentando a eficácia da inspeção e diminuindo o risco ao operador.

A grande dificuldade deste tipo de processo de inspeção é o controle de voo da aeronave, que deve se aproximar consideravelmente da torre e dos seus elementos para permitir uma aquisição de dados adequada, o que pode gerar acidentes. Em muitas situações o piloto deve manobrar a aeronave a uma distância considerável, podendo inclusive ter que operá-la através de vídeo pela distância envolvida, o que limita consideravelmente a visualização de possíveis

obstáculos durante seu deslocamento e a avaliação precisa da posição da aeronave em relação as estruturas de transmissão. A figura 2 mostra um exemplo de pilotagem de VANT para inspeção de torres, demonstrando a dificuldade de se manobrar a aeronave nas proximidades das estruturas.

Figura 2 – Foto de um voo de inspeção demonstrando a proximidade do VANT em relação à torre e aos cabos de energia.



Fonte: O autor

O processo de inspeção detalhada de torres é lento, exigindo o deslocamento do técnico e dos equipamentos ao longo da linha para sua execução. Propostas para melhoria da eficácia desse processo são de grande interesse das operadoras de energia, tanto no Brasil quanto no restante dos países. A utilização de VANT's com sensoriamento de posição e detecção de obstáculos de alta confiabilidade pode permitir a criação de sistemas inteligentes de controle e navegação, na busca de minimizar esses riscos para os pilotos e operadores.

A utilização de VANTs multi-rotorés na inspeção detalhadas de torres e postes de distribuição de energia é interessante tanto do ponto de vista técnico quanto do ponto de vista econômico para as operadoras de energia elétrica. A questão econômica se justifica pelo baixo custo deste tipo de aeronave quando comparado ao custo de utilização de um helicóptero tripulado. O uso de *drones e robótica* é citado como um dos objetivos específicos de curto prazo para a modernização da operação e manutenção dos sistemas de distribuição no estudo intitulado *Prospecção Tecnológica no Setor de Energia Elétrica* conduzido pela ANEEL (ANEEL, 2017).

As vantagens técnicas dos veículos multi-rotorés incluem a possibilidade de capturar imagens de posições variadas ao redor da torre, muitas vezes em ângulos que não são possíveis

para o técnico que realiza a escalada da mesma ou da aeronave tripulada pela necessidade de proximidade da estrutura. Além disso, apresentam uma boa flexibilidade para o embarque de sensores e câmeras de diversos tipos para análise dos componentes, aumentando a qualidade dos dados coletados (XIE *et al.*, 2017). Outra vantagem operacional significativa é a possibilidade de atingir locais de difícil acesso, inviáveis ao técnico nas inspeções realizadas a pé, além de permitir a decolagem de locais distantes do site de inspeção, facilitando a montagem da base operacional. O processo de inspeção utilizando este tipo de veículo apresenta diversos desafios técnicos e operacionais, a saber:

- As estruturas das torres são formadas de segmentos metálicos na forma de treliça, o que dificulta a sua detecção por sensores de colisão tradicionais, como sensores ultrassônicos e do tipo *Light Detection And Ranging* (LIDAR), o mesmo ocorrendo com os cabos (BERGER *et al.*, 2019).
- A presença de campos eletromagnéticos próximos às linhas de distribuição pode criar interferência nos sensores de navegação presentes na *Unidades de Medidas Inerciais* (IMU), levando a uma perda de controle da aeronave (PARK *et al.*, 2020).
- Além dos sensores, os sistemas de comunicação via rádio também podem sofrer interferências pela presença de campos eletromagnéticos, levando à perda de controle da pilotagem e na falha da transmissão de dados para a estação base (HUERTAS *et al.*, 2009).
- Os sistemas de comunicação necessários ao controle e transmissão de dados da aeronave não estão presentes em muitos dos locais de operação, exigindo a utilização de uma estrutura própria, com alcance limitado pela capacidade dos sistemas portáteis utilizados.
- Condições ambientais adversas como iluminação solar intensa, sombreamento, cobertura de nuvens, presença de obstáculos naturais e artificiais, entre outros, podem influenciar no funcionamento dos sistemas de navegação por Sistemas de Posicionamento Global (*Global Positioning System* - GPS) ou sistemas de controle de voo por visão, levando a uma perda de referência de posição para a aeronave.
- Rajadas de vento são comuns em campo aberto, e podem levar à colisões com as estruturas, dificultando o controle autônomo da aeronave devido à alta imprevisibilidade deste tipo de fenômeno.

- A presença de mais de uma torre na mesma área traz dificuldades na definição das rotas de voo possíveis para atingir os pontos de visada necessários. A presença de árvores, prédios e outras estruturas próximos à torre a ser inspecionada também pode ser observada em algumas situações, causando dificuldades adicionais neste caso.

A utilização de veículos autônomos para a construção de sistemas de inspeção é uma forma interessante de buscar soluções para os problemas citados acima. Em particular, o uso de veículos terrestres e veículos aéreos autônomos apresenta vantagens para a construção dessas soluções, devido às vantagens operacionais que cada um oferece.

No caso do veículo aéreo, a pesquisa de soluções para aumentar a segurança do voo é essencial ao pleno desenvolvimento do potencial dessa ferramenta. Para realizar um voo autônomo no ambiente de uma torre de distribuição de energia, uma aeronave não tripulada deve ser capaz de oferecer um alto grau de confiabilidade de posicionamento e navegação, além da capacidade de detecção de obstáculos presentes em seu entorno.

Uma abordagem típica para fornecer dados de posicionamento precisos para um VANT em um voo autônomo é a utilização de um Sistema Global de Navegação por Satélite Diferencial (DGNSS), entre elas os sistemas do tipo *Real Time Kinematic-GPS* (GPS-RTK). Nesta abordagem, uma estação base estática (*base*) envia os dados de correção de posição para o módulo móvel embarcado na aeronave (*rover*) e calcula a sua posição com uma precisão de um centímetro. Esta técnica é uma solução altamente eficaz para fornecer posicionamento horizontal preciso para aeronaves pequenas, mas apresenta exigências de condições operacionais específicas para funcionar corretamente.

A presença de obstáculos, sombreamento da antena de base por construções ou árvores, falha de comunicação entre a antena base e móvel, interferência eletromagnética nos módulos e condições ambientais não adequadas, como operação em dias nublados, podem gerar a perda de exatidão do posicionamento (ZIMMERMANN *et al.*, 2017). Torna-se assim essencial o desenvolvimento de soluções de posicionamento de precisão complementares para composição de uma metodologia confiável aplicável ao sistema de controle de um VANT que opere na inspeção de estruturas de transmissão de energia, nas condições como as descritas neste trabalho de pesquisa.

No caso do Veículo Terrestre Não Tripulado (VTNT) o problema de navegação precisa também é um desafio técnico quando a operação do veículo se dá em ambiente não estruturado. Presença de obstáculos, acidentes geográficos no terreno, locais com alagamento, rampas com

grau de inclinação elevado, desníveis, obstáculos móveis, entre outros, tornam a navegação autônoma um problema complexo que exige soluções específicas para cada tipo de aplicação.

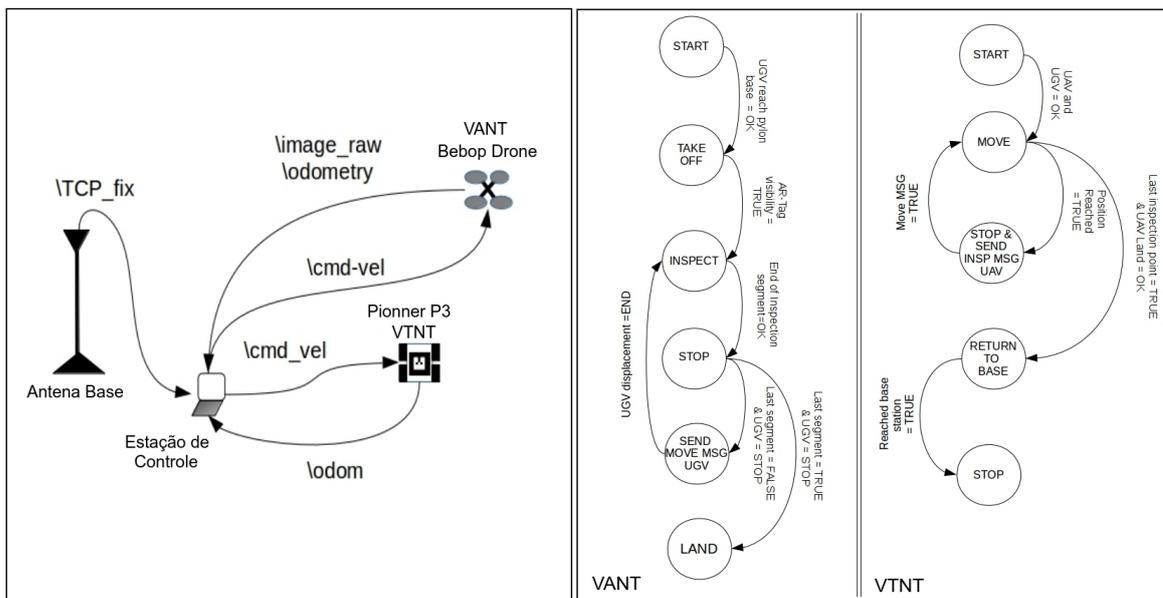
O sensoriamento de posição e navegação normalmente utilizado em VTNTs é baseado principalmente em posicionamento através de odometria utilizando-se sensores inerciais, posicionamento por satélite, mapeamento e localização em ambientes através de LIDAR e sistemas de navegação através de visão computacional (ROSIQUE *et al.*, 2019). Através da fusão de dados desse conjunto de sensores o veículo obtém a cada momento a informação de posição em relação ao ambiente e ao mapa global.

No ambiente externo e não estruturado de navegação, como é o caso dos locais onde as torres de transmissão de energia estão instaladas, a navegação torna-se um desafio adicional para esses veículos. No caso dos sensores inerciais, a derrapagem do veículo pode gerar uma perda de localização, uma vez que este tipo de sensor não trabalha com uma referência temporal relativa à sua posição anterior, diferentemente de um sistema baseado em GPS, por exemplo. Esse fator torna a manutenção da precisão do posicionamento de veículos autônomos um desafio considerável (ILAS, 2013). A navegação através de LIDAR sofre com a variabilidade dos pontos de referência ao redor do veículo, necessários para o cálculo da posição relativa e do deslocamento do mesmo ao longo da trajetória (ROYO; BALLESTA-GARCIA, 2019; SCHLEUNING; DROZ, 2020). A variação de luminosidade ambiente e a presença de poucos pontos de destaque nos arredores aumenta a incerteza dos sistemas de navegação visual. No caso do posicionamento por *Real Time Kinematic GPS* (GPS-RTK), o fato do veículo navegar no solo dificulta a recepção dos sinais dos satélites e também do link de comunicação necessário para a correção de posição. Todos estes desafios indicam a necessidade de proposição de novas técnicas de posicionamento que possam fazer frente às adversidades deste tipo de ambiente de operação no caso de um sistema autônomo. A operação conjunta entre o VTNT e o VANT pode oferecer soluções flexíveis para este problema, como por exemplo a realização do mapeamento do solo pelo VANT na área de operação do veículo terrestre para possibilitar a definição de uma rota adequada para o seu deslocamento, como exemplificado na pesquisa descrita em (CANTELLI *et al.*, 2017).

O presente estudo propõe a criação e avaliação de um método de posicionamento cooperativo entre um Veículo Aéreo não Tripulado e um Veículo Terrestre não Tripulado, para aplicação nas operações de inspeção de torres e postes de distribuição de energia elétrica. A figura 3 mostra uma visão geral do método proposto.

Considerando-se os pontos discutidos, nota-se que o desafio de se obter dados de posição da aeronave e do veículo terrestre com exatidão e confiabilidade necessárias durante a operação em um ambiente externo e não estruturado como aqueles aonde se encontram as torres e postes de distribuição, ainda é um problema aberto no estado da arte atual, demandando a proposição de soluções que tragam maior confiabilidade e segurança na operação autônoma dos mesmos, o que é a proposta fundamental desse trabalho de pesquisa.

Figura 3 – Visão geral do sistema cooperativo de inspeção.



Fonte: O autor

A criação de um sistema colaborativo de inspeção oferece algumas vantagens como:

- Aumento do alcance de operação, onde o VTNT serve como uma base de recarga para o VANT durante o processo de inspeção.
- Possibilidade de utilização de sensoriamento de diversos tipos para a inspeção, aproveitando as características específicas de cada veículo para o embarque de sensores que permitam captura de dados específicos para cada situação.
- Permitir a realização das inspeções detalhadas aéreas e de solo concomitantemente, pelo fato de cada veículo possuir capacidade de acesso a uma região específica dos arredores da torre, possibilitando a criação de um mapa de inspeção mais detalhado em relação que seria possível utilizando-se apenas de um dos veículos.
- Possibilitar a composição de dados de posicionamento dos dois veículos para aumentar a confiabilidade do posicionamento e do seguimento de trajetória de ambos, aproveitando-se

da característica específica de cada veículo (Ex: o RTK-GPS funciona melhor em voo do que no solo, devido à melhor recepção de sinais, enquanto a odometria via LIDAR funciona melhor no veículo terrestre por que o sensor captura um número maior de pontos de referência no solo)

- Possibilitar a criação de uma arquitetura de comunicação melhorada entre os veículos e a estação base, utilizando-se do fato do VANT realizar a inspeção em uma altura que facilita a visada de antenas transmissoras presentes nesta estação, com possível retransmissão para o veículo de solo, possibilitando um alcance maior para o *link* de comunicação.

As limitações deste sistema colaborativo são relacionadas principalmente às condições de acesso presentes nos arredores das torres a serem inspecionadas. O veículo terrestre deverá possuir capacidade de operar em solos não pavimentados. Mesmo assim, em algumas situações o veículo poderá não obter acesso à posição adequada para a realização da inspeção pelo tipo do terreno. As imagens apresentadas na figura 4 mostram exemplos deste tipo de situação.

Figura 4 – Imagens de locais com impedimento de acesso à um veículo terrestre de inspeção.



a) Configuração complexa das torres.

b) Área de difícil acesso.

c) Área com risco devido à erosão.

Fonte: APTEL (RESENDE, 2017)

Apesar dessa limitação, o método se mostra interessante para o aumento da produtividade nos processos de inspeção, tendo em vista o grande número de torres e postes de distribuição de energia em locais que oferecem as condições necessárias à sua operação. A figura 5 mostra um exemplo de área aonde o sistema poderia ser utilizado, evidenciando a possibilidade de uso do sistema cooperativo e suas vantagens operacionais.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO DE PESQUISA

O objetivo principal deste trabalho de pesquisa é proposição de um método cooperativo de posicionamento entre um VANT e um VTNT para aplicação em processos de inspeções

Figura 5 – Imagens de local com acesso adequado para a operação do sistema proposto.



Fonte: Marcos Santos/USP Imagens (SANTOS, 2020)

detalhadas de torres e postes de distribuição de energia.

Os objetivos específicos são:

- Estudar, analisar e propor parâmetros técnicos para a operação de sistemas de inspeção detalhados de torres e postes de distribuição de energia baseado em VANTs autônomos, que possam oferecer uma base para o desenvolvimento deste tipo de sistema, visando a segurança e adequação da operação.
- Propor e validar um método de posicionamento em voo do VANT, baseado em processamento visual de etiquetas posicionadas no solo, com imagens capturadas pela câmera embarcada na aeronave.
- Propor e realizar a experimentação de um método de posicionamento cooperativo entre o VANT e o VTNT, baseado em visão computacional, que ofereça dados de posicionamento para o veículo de solo, permitindo uma navegação cooperativa dos veículos durante seus deslocamentos.

1.3 JUSTIFICATIVA E CONTRIBUIÇÕES GERADAS PELO TRABALHO DE PESQUISA

Os sistemas colaborativos entre veículos aéreos e veículos terrestre não tripulados apresentam diversas vantagens técnicas e operacionais em relação à utilização individual desses, pela complementaridade de suas estruturas físicas e lógicas. Para que um sistema deste tipo opere adequadamente, é necessária a criação de métodos de posicionamento de precisão de alta confiabilidade para a navegação dos veículos durante a execução das tarefas da inspeção, devido às exigências operacionais e às condições do ambiente onde as inspeções são realizadas. Diversos métodos que visam a solução desta questão são propostos na literatura técnica e científica, mas ressalta-se que o atual estado da arte não apresenta soluções definitivas para este tipo de problema, como demonstrado no capítulo 2. Esta é a principal justificativa para a realização deste estudo, como primeiro passo para a implementação de uma solução completa de inspeção cooperativa de estruturas de transmissão de energia elétrica.

A principal contribuição deste trabalho é a proposição de um novo método de posicionamento colaborativo entre um VANT e um VTNT para aplicação nas operações de inspeção de postes e torres de transmissão de energia elétrica, visando aumentar a segurança dos deslocamentos autônomos dos veículos durante o processo de inspeção. As vantagens do método proposto são as seguintes:

- Aplicação simples, baseada em recursos de sensores comumente disponíveis de baixo custo (câmera RGB, IMU).
- Comparado com os sensores IMU e RTK-GPS, o método proposto apresenta maior robustez contra distúrbios de campo elétrico e magnético na área de inspeção. (HUERTAS *et al.*, 2009; GIBBINGS *et al.*, 2001)
- A plataforma de inspeção colaborativa pode aumentar a capacidade de aquisição de dados de inspeção, permitindo o uso de vários sensores embutidos em cada veículo em um arranjo complementar, como sensores de zoom óptico, sensores de imagem térmica e multi-espectral, LIDAR de longo alcance e detectores de faísca por RF, gerando assim um conjunto de dados consideravelmente maior para a análise de defeitos na estrutura.

As contribuições secundárias desta pesquisa são as seguintes:

- Definição formal dos parâmetros de posicionamento dos VANTs e de questões como as margens de segurança dos voos e distâncias necessárias para a navegação da aeronave de forma segura durante as operações de inspeção.
- Experimentação, em ambiente externo com condições de iluminação e influências ambientais não controladas, da utilização de etiquetas impressas como referência fixa em solo para a obtenção de posicionamento de precisão para voo de VANTs.
- Implementação e avaliação de um sistema de controle de posição e deslocamento para VTNT utilizando-se de retroalimentação visual baseada na referência terrestre por etiquetas provida pelo VANT durante o voo.

1.4 PUBLICAÇÕES GERADAS DURANTE A PESQUISA EM ORDEM CRONOLÓGICA

A primeira publicação referente ao projeto foi o capítulo *Environment for the Dynamic Simulation of ROS-Based UAVs* na edição número 2 do livro *Robot Operating System (ROS) - The Complete Reference* (CANTIERI *et al.*, 2017a) da editora Springer. Neste capítulo um ambiente de simulação de UAV's desenvolvido no simulador V-REP foi apresentado, como forma de propiciar aos leitores um ponto de partida para a simulação de aeronaves autônomas utilizando este simulador. Este trabalho foi muito importante para o desenvolvimento da pesquisa, por propiciar o primeiro contato do doutorando com o assunto da simulação de VANT's e com as ferramentas utilizadas para este fim.

A segunda publicação ligada ao projeto foi um artigo publicado no congresso *Latin American Robotics Symposium - LARS - 2017* (CANTIERI *et al.*, 2017b), realizado em Curitiba, Paraná. O título do trabalho foi *Collaborative quadricopter-mobile robots ground scan using ARTAGS visual pose estimation*. Neste trabalho um quadricóptero e três robôs de solo realizavam um descolamento colaborativo utilizando um sistema de baseado em etiquetas de realidade aumentada (AR-Tags) posicionada na parte superior dos robôs, que proviam referência aos mesmos em relação ao veículo aéreo. A ideia do trabalho, realizado no ambiente de simulação V-REP, foi de demonstrar a possibilidade de se utilizar o posicionamento colaborativo como única fonte de informações de posição para os robôs de solo, uma vez que estes não possuem sistema de odometria embarcada. Este trabalho serviu como ponto de partida para a proposta do sistema cooperativo apresentado neste trabalho de pesquisa.

Este artigo foi estendido para um outro capítulo de livro, na forma de um tutorial,

publicado no *Robot Operating System (ROS) - The Complete Reference - Volume 3* sob o título *A Quadcopter and Mobile Robot Cooperative Task Using Visual Tags Based on Augmented Reality ROS Package* (CANTIERI *et al.*, 2019). Neste tutorial, todo o processo de construção do ambiente virtual, dos scripts de controle e demais ferramentas utilizadas é detalhado de forma a permitir sua reprodução pelo leitor e também a construção de novas aplicações baseadas na mesma.

Um artigo de título *Analysis of Low Cost Sensors Applied to the Detection of Obstacles in High Voltage Towers*, que descreve e analisa os resultados das avaliações dos sensores anti-colisão em componentes de linhas de alta tensão, foi publicado no *The 6th International Embedded Systems Symposium* (BERGER *et al.*, 2019). Este artigo apresenta uma análise dos resultados das medidas realizadas em laboratório, dos sensores de baixo custo que equipam o VANT experimental montado durante a realização deste trabalho de pesquisa, de forma a evitar colisão com as estruturas da torre.

Um artigo foi publicado evento "14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente -SBAI". O artigo, de título *Proposta e avaliação de uma arquitetura de inspeção autônoma de torres de distribuição de energia elétrica baseada em VANT* (CANTIERI *et al.*, 2019), descreve a construção e testes de uma arquitetura de VANT para inspeção de torres de distribuição com sensoriamento especificamente projetado e avaliado para a detecção da torre e de seus componentes.

Outro artigo foi publicado no *ROBOT'2019: Fourth Iberian Robotics Conference* (CANTIERI *et al.*, 2020), realizado na Cidade do Porto, em Portugal. Este artigo, de título *Propose and Evaluation of a precision positioning architecture for UAV power line tower inspection using augmented reality tag*, descreve a proposta de um sistema auxiliar de posicionamento de voo para VANT autônomo em tarefas de inspeção de torres de energia, baseado na utilização de AR-Tags. O trabalho realizou uma avaliação da viabilidade do controle da aeronave utilizando as tags através de simulação, além de testes e ambiente real da performance do sistema de detecção e processamento das tags utilizando o Bebop Drone como base para os mesmos.

Um artigo que descreve a proposta de sistema colaborativo de posicionamento entre um veículo terrestre e um veículo aéreo autônomos foi publicado na revista MDPI-Sensors, sob o título *Cooperative UAV-UGV Autonomous Power Pylon Inspection: An Investigation of Cooperative Outdoor Vehicle Positioning Architecture* (CANTIERI *et al.*, 2020), na edição especial "UAV-Based Smart Sensor Systems and Applications". Este artigo descreve a proposta geral

da arquitetura do sistema colaborativo de inspeção e a solução de posicionamento cooperativo descrita nesta tese, como resultado dos experimentos elaborados e executados para a validação da solução proposta.

1.5 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

Este documento está organizado da seguinte forma: neste capítulo de introdução foi realizada uma descrição geral do problema de pesquisa e definidos os objetivos e contribuições a serem atingidos. O capítulo 2 apresenta uma revisão do estado-da-arte, que buscou identificar trabalhos que apresentam as bases técnicas e científicas para a proposição das soluções realizadas nesta pesquisa, e a comparação com outras soluções similares descritas na literatura. O ferramental técnico, recursos computacionais utilizados no desenvolvimento são descritos no capítulo 3. A descrição detalhada do método proposto e suas particularidades é realizada no capítulo 4. O capítulo 5 apresenta os resultados dos experimentos, descrevendo-os sistematicamente através da compilação dos dados obtidos. No capítulo 6 apresentam-se as conclusões sobre os resultados encontrados e as perspectivas de trabalhos futuros que possam integrar o conjunto desta pesquisa em seu campo mais amplo.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão da literatura realizada foi organizada de forma a avaliar os principais trabalhos publicados nos últimos 10 anos aproximadamente, dentro das áreas de interesse discutidas nesta tese. As pesquisas foram realizadas através do portal de Periódicos da CAPES, do site *IEEE Xplore* e do Google Acadêmico. Os termos de pesquisa foram relacionados na forma decrescente de especificidade, como por exemplo *Autonomous power pylon UAV inspection* no nível mais específico até os termos mais gerais como por exemplo *UAV inspection*. Os artigos relacionados na pesquisa foram separados, categorizados e posteriormente analisados, buscando identificar contribuições do mesmo tipo daquelas propostas no trabalho.

A categorização da pesquisa é descrita neste capítulo em uma abordagem do tema mais geral ao tema mais específico, relacionando as técnicas, ferramentas e propostas que apresentam resultados similares ou que serviram como base para a concepção das técnicas e do método aqui apresentado. A divisão deste capítulo foi pensada de forma a facilitar o entendimento do estado da arte e dos assuntos relacionados, apresentando inicialmente os trabalhos mais gerais ligados ao grande tema da inspeção de infraestrutura e passando posteriormente a temas mais específicos, como a inspeção detalhada de torres através de veículos autônomos, até finalmente apresentar os trabalhos relacionados com ferramentas diretamente utilizadas na pesquisa desenvolvida, como sistemas de posicionamento de VANTs através de sistemas de visão baseados em etiquetas visuais.

2.1 INSPEÇÃO DE ESTRUTURAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ATRAVÉS DE VEÍCULOS NÃO TRIPULADOS

A inspeção de estruturas de distribuição de energia elétrica através de veículos não tripulados teve um início de disseminação nas operadoras na década de 90, com a utilização de veículos seguidores de linha e veículos aéreos não tripulados, além da concepção de algumas soluções híbridas. Alguns trabalhos de revisão apresentam uma análise de equipamentos deste tipo desenvolvidos até recentemente, mostrando uma visão sobre a utilização de VANTS para aplicações civis, incluindo a de inspeção de linhas de transmissão (ALHASSAN *et al.*, 2020; SHAKHATREH *et al.*, 2019). Podemos identificar nestas revisões algumas áreas específicas onde estão concentrados os trabalhos de pesquisa, a saber:

- Desenvolvimento de aeronaves telecomandadas ou guiadas por GPS com sensoriamento específico para a coleta de imagens e dados das linhas de distribuição de energia.
- Pesquisa de algoritmos de identificação das linhas e torres através de visão computacional e *deep learning* para posicionamento de voo das aeronaves ao longo das linhas.
- Propostas de sistemas de levantamento de informações da rede baseados em processamento de imagens ou mapeamento 3D baseados em sensores do tipo LIDAR.
- Implementação de algoritmos de identificação automática de defeitos em componentes, baseados principalmente em sistemas de visão computacional.
- Desenvolvimento de técnicas de navegação e sistemas de posicionamento para VANT's autônomos.

Entre as linhas descritas acima, definiu-se os focos deste trabalho de pesquisa o desenvolvimento de uma aeronave experimental autônoma de baixo custo para inspeção de torres e postes de distribuição, e a proposição de um método de posicionamento cooperativo entre um veículo aéreo e um veículo de solo.

2.2 ARQUITETURAS ESPECÍFICAS DE VANTS PARA INSPEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

A primeira parte do trabalho realizado durante o desenvolvimento desta tese teve como foco a proposição, desenvolvimento e avaliação de uma aeronave de pequeno porte do tipo multi-rotor, não tripulada e de baixo custo, para aplicação em inspeção detalhada de torres e postes de transmissão e distribuição de energia. Trabalhos similares publicados na área foram avaliados para dar a base do estado da arte deste tema da pesquisa.

O desenvolvimento de aeronaves específicas para coleta de dados e imagens foi o primeiro foco de pesquisa dentro da área de inspeção de estruturas de transmissão de energia com VANTS. Os primeiros trabalhos desta área buscavam principalmente propor e construir arquiteturas de aeronaves telecomandadas ou guiadas por GPS para percorrer e capturar e imagens regulares e térmicas das linhas e componentes do sistema de distribuição.

Um grupo de autores descreve um helicóptero autônomo baseado em GPS tradicional para aplicação na inspeção de linhas de transmissão. Trata-se de um helicóptero a gasolina e 1,8 m de diâmetro de hélice, com capacidade de carga de 12,3 Kg. O interessante deste trabalho

é que o veículo é equipado com um sensor de obstáculos *laser scanner* e com uma câmera estereoscópica, o que é bastante inovador para a época devido à dificuldade de acesso a esses equipamentos em versões para embarque em aeronaves de pequeno porte (HRABAR *et al.*, 2010).

Em artigo do ano de 2013 os autores descrevem a concepção de um helicóptero de pequeno porte à gasolina autônomo para utilização em avaliação de linhas de transmissão. O aparelho conta com duas câmeras, uma infra-vermelha (*Infra-Red -IR*) e outra regular de alta definição, que capturam as imagens da linha de transmissão e possibilitam a verificação de defeitos (LI *et al.*, 2013).

Outro trabalho desta linha descreve a montagem de um veículo aéreo do tipo quadricóptero com controle automático de posição através de GPS. O modelo físico do veículo e a interface de controle eletrônico são desenvolvidas pelo grupo, além do modelamento do controle através de PID (RAFIQUE *et al.*, 2014) .

Um artigo do ano de 2014 descreve a construção de um quadricóptero para aplicação em inspeção de componentes de linhas de transmissão. O veículo pode operar por controle remoto ou por voo autônomo através de GPS. O veículo é equipado com uma câmera regular e uma câmera termal, que transmitem as imagens para processamento na estação base, permitindo uma identificação de possíveis pontos de defeito na estrutura de forma mais eficaz (LUQUE-VEGA *et al.*, 2014).

Em um artigo mais recente um grupo de autores apresenta uma arquitetura de multi-rotor bastante inovadora, que combina as características de uma aeronave com de um robô escalador de linha. Um quadricóptero foi projetado para operar de forma híbrida neste caso, realizando o voo em alguns pontos e se deslocando sobre os cabos da linha de transmissão em outros. Essa proposição é bastante interessante por permitir uma diminuição considerável no consumo energético da aeronave durante o deslocamento entre duas torres, aumentando dessa forma seu alcance, e ao mesmo tempo mantendo a característica de voo para inspeção das torres e elementos necessários. Os autores realizaram testes de laboratório para validar a ideia. No artigo não são apresentados testes de campo (CHANG *et al.*, 2017).

Apresentamos uma visão comparativa entre os trabalhos relacionados e a proposta de arquitetura de aeronave experimental desenvolvida neste trabalho na tabela 1. Através da revisão realizada pode-se identificar soluções que embasaram a construção de um modelo de aeronave do tipo multi-rotor para realização de experimentos propostos neste trabalho. A descrição e

detalhamento deste veículo, seu sistema de controle de voo e sensoriamento de navegação e detecção de obstáculos é apresentada no capítulo 3.

Tabela 1 – Comparação entre os trabalhos que propõe arquiteturas de VANTs para aplicação em inspeções de sistemas de transmissão de energia

Trabalho	Veículo	Controle de navegação	Sensores de Colisão	Sensores de inspeção	Payload	Propulsão	Foco da Pesquisa
Hrabar, 2010	Helicóptero	Telecomando GPS	Câmera estereo LIDAR 2D	Não implementados	12,3 Kg	Gasolina	Vôo autônomo e detecção de obstáculos
Li, 2013	Helicoptero	Telecomando	Não	Câmera RGB Câmera termal	11,0 Kg	Gasolina	Captura de imagens
Rafique, 2014	Quadricóptero	GPS	Não	Câmera RGB	2,5 Kg	Elétrico	Desenvolvimento do Modelo
Luque-Vega, 2014	Quadricóptero	GPS	Não	Câmera RGB Câmera Termal	n/e	Elétrico	Processamento digital das imagens e identificação de defeitos
Chang, 2017	Quadricóptero ou Seguidor de Linha (conversível)	Automático por Point-Cloud	LIDAR 2.5D (Planar com movimentação em z)	Não	n/e	Elétrico	Desenvolvimento de veículo híbrido
Modelo construído	Quadricóptero	Pilotado, GPS ou visual	LIDAR 2D Ultrassom	Câmera RGB Câmera Termal	0.8 Kg	Elétrico	Teste de algoritmos e posicionamento colaborativo

Fonte: O autor

2.3 SISTEMAS DE CONTROLE DE NAVEGAÇÃO AUTÔNOMA ATRAVÉS DE PROCESSAMENTO DE IMAGENS E VISÃO COMPUTACIONAL

Outra parte da pesquisa que compoe esta tese se relaciona ao tema da navegação autônoma e posicionamento de precisão de VANTs através do uso de algoritmos de visão computacional. Devido à dificuldade inerente à navegação de um VANT em ambiente externo e em grandes distâncias, a alternativa de controle por visão computacional (*visual servoing*) torna-se uma ferramenta importante, e tem recebido bastante atenção nas pesquisas. Os algoritmos de visão computacional utilizam pistas visuais presentes no ambiente para calcular a posição e orientação da aeronave. Alguns artigos de revisão sobre o assunto estão presentes na literatura, oferecendo uma visão geral sobre o tema.

Em um artigo do ano de 2018 é apresentada uma revisão de algoritmos de visão computacional para aplicações de VANT, incluindo a descrição de trabalhos relacionados a inspeções de linhas de energia. Na seção de conclusão, este artigo cita alguns desafios para a aplicação desses algoritmos em tarefas externas, especialmente a alta sensibilidade às condições

de iluminação (AL-KAFF, 2018).

Um grupo de autores apresenta uma revisão sobre o controle de visão para VANTs com foco em aplicações de inspeção de infraestrutura (MÁTHÉ; BUSONI, 2015). O artigo analisa trabalhos que aplicam algoritmos de fluxo óptico, algoritmos de *Feature Detection*, métodos de localização e mapeamento simultâneos (*Simultaneous Localization And Mapping - SLAM*), e afirma que "cada método é adequado para tipos específicos de ambientes e objetos alvo". Essa afirmação indica que o controle da visão do VANT ainda requer uma pesquisa significativa, dependendo da aplicação de inspeção específica.

Um outro grupo de autores apresenta uma extensa revisão das técnicas de inspeção automática de linhas de energia baseadas em visão. Os autores concluem que "nenhuma navegação de alta velocidade, totalmente autônoma e baseada na visão para inspeção de linhas de energia foi desenvolvida com sucesso", indicando que pesquisas adicionais para resolver problemas práticos relacionados a tais aplicações ainda são necessárias (NGUYEN *et al.*, 2018).

Para implementar algoritmos de odometria visual, pontos de referência visuais adequados devem ser fornecidos no terreno, o que nem sempre é possível. A variabilidade dos objetos que servem como referência visual gera dificuldades para a identificação através de algoritmos automáticos, o que acarreta altos custos computacionais. Esses aspectos são discutidos em detalhes no trabalho de (AQEL *et al.*, 2016).

A revisão da literatura do tema específico buscou identificar o estado da arte relativo à navegação e posicionamento das aeronaves ao longo de linhas de transmissão para inspeções aéreas e as propostas de sistemas de posicionamento e odometria para aplicações de inspeção detalhada de torres. Primeiramente foram apresentadas as propostas específicas para sistemas de posicionamento e navegação de VANTs em aplicações de seguimento das linhas de transmissão de energia.

Um grupo de autores descreve um sistema de navegação para um veículo aéreo não tripulado. O veículo possui uma câmera RGB e uma infravermelha além de posicionamento por GPS. No estudo foram implementados algoritmos de detecção de linhas de transmissão para navegação capazes de calcular a distância entre a linha e a aeronave e entre a linha e o chão. O foco deste algoritmo é a manutenção da altura relativa entre a aeronave e as linhas durante o vôo (LARRAURI *et al.*, 2013).

Em um trabalho desenvolvido em 2014, os autores implementam um sistema de controle autônomo de quadricóptero para seguir linhas de energia baseado nesta abordagem. A primeira

é chamada *IBVS*, "*Adaptative Image Based visual Servo Controlling*". Utiliza imagens em 2D sequenciais para retirar parâmetros de navegação do veículo, como velocidade, posição relativa etc. Na segunda técnica, chamada *Partial Pose Based Visual Servoing Controlling*, realiza-se a aquisição de uma posição parcial do quadricóptero baseada puramente na medição de parâmetros retirados da imagem (ARAAR; AOUF, 2014).

Um artigo do ano de 2018 faz a proposição de um algoritmo de detecção das estruturas de uma linha de transmissão para uso em um sistema de controle de navegação visual. O algoritmo é dividido em três partes, detecção das torres, detecção das linhas e medição da distância da aeronave em relação às estruturas. Faz uso de redes neurais para detecção das torres e logo após aplica técnicas chamadas *Line Segment Detector* e *Progressive Probabilistic Hough Transformation (PPHT)* para identificação das linhas. Posteriormente um algoritmo de triangulação baseado na posição das torres detectadas é utilizado para definir o posicionamento da aeronave (BIAN *et al.*, 2018).

Um sistema de controle de posição e navegação autônoma para seguimento de linhas de distribuição de energia foi implementado e avaliado utilizando-se um quadricóptero elétrico. O veículo utiliza dados de GPS e de sua unidade de medição inercial, (*Inertial Measurement Unit - IMU*) e adiciona informações de posicionamento relativo às linhas de transmissão obtidos através de captura e processamento de imagens. Um algoritmo de visão do tipo *Histogram of Oriented Segments* busca segmentar as linhas e identificar a sua posição em relação à aeronave, realimentando o sistema de controle de posição para efetuar seu seguimento (CERÓN *et al.*, 2018).

Os trabalhos aqui citados tem o foco em permitir a navegação das aeronaves ao longo das linhas de transmissão para a captura de imagens em inspeções aéreas não detalhadas, onde esses veículos realizam o voo a uma certa distância das estruturas, e o sistema de controle tem o objetivo de manter a posição relativa à estas. No caso da inspeção detalhada de torres, esse grau de exatidão de posicionamento é inadequado, exigindo a proposição de algoritmos específicos para esta aplicação, o que é o objetivo do método desenvolvido nesta tese. A pesquisa por trabalhos com o foco específico nas operações autônomas de inspeção detalhada de postes e torres através de VANTs apresentou poucos resultados, indicando uma lacuna nas soluções para este problema específico.

Um dos trabalhos publicados na área descreve a implementação de um algoritmo de estimação de deslocamento do VANT baseado em um sistema de câmera monocular que utiliza a

torre como base para o cálculo. A técnica primeiramente identifica e extrai a posição da torre na imagem para posteriormente realizar a estimativa do deslocamento através do cálculo diferencial dos pixels correspondentes à quadros consecutivos, similarmente a algoritmos de *optical flow* (ARAAR *et al.*, 2015).

Uma nova técnica chamada *Point-Line-Based SLAM* foi proposta para calcular o centro da torre com base em processamento de imagens capturadas pela câmera do VANT. Os autores relatam um erro de posição na ordem de 0,72 m nos resultados. A técnica utiliza duas placas de processamento gráfico de alta performance para a implementação dos algoritmos (BIAN *et al.*, 2019).

Um algoritmo que utiliza um LIDAR planar (2D LIDAR) para detectar e calcular a posição da aeronave em relação à torre é proposto em outro artigo. O algoritmo utiliza um cálculo de centro geométrico dos pontos detectados para calcular a posição relativa entre o VANT e a torre. Neste trabalho não foi implementado sistema de reconhecimento da torre, o que é uma limitação, pois exige que a aeronave se mantenha alinhada com a estrutura da torre para funcionar corretamente (VIÑA; MORIN, 2018).

Analisando as soluções propostas na literatura, foi possível identificar uma lacuna na proposição de métodos de posicionamento de precisão especificamente propostos para aplicação em inspeção detalhada de torres e postes de distribuição de energia elétrica. Dessa forma a pesquisa realizada neste trabalho de pesquisa buscou propor métodos que pudessem contribuir com a solução deste problema específico. A tabela comparativa 2 mostra um resumo dos trabalhos descritos neste documento e as soluções propostas nos mesmos, comparando-as com os métodos desenvolvidos no presente trabalho de pesquisa.

2.4 POSICIONAMENTO DE VANTS ATRAVÉS DE ETIQUETAS VISUAIS DE SOLO ("ARTIFICIAL TAGS")

Uma forma de se diminuir a exigência de processamento computacional em sistemas de posicionamento e navegação de veículos baseado em visão computacional é a utilização de *etiquetas visuais artificiais*. As etiquetas são elementos especificamente projetados para oferecer uma referência visual que facilita a detecção e processamento, aumentando a confiabilidade e a estabilidade do sistema de navegação. Essas etiquetas são normalmente desenhos específicos impressos e dispostos em posições estratégicas pra facilitar sua visualização pelos sistemas de visão, mas outros tipos de marcadores visuais, como sinalizadores luminosos também podem ser

Tabela 2 – Comparação entre os trabalhos de algoritmos de posicionamento de VANTs por sistemas de visão e similares

Trabalho	Veículo	Algoritmo	Câmeras	Tipo em relação à:	Foco da Pesquisa
Araar, 2014	AR-Drone	IBVS e PPBVC	VGA 60 FPS	Linha	Seguimento de Linha
Bian, 2018	Quadricóptero	Perspective navigation model	Full - HD	Linha	Identificação das torres e geração de trajetória
Rafique, 2014	Quadricóptero	Histogram of oriented segments e Circle-based search	USBFHD01M	Linha	Identificação e seguimento de linhas
Araar, 2015	Quadricóptero	Detecção dos segmentos e cálculo de deslocamento de pixels entre quadros	Pinhole camera	Torre	Cálculo do deslocamento da aeronave em relação à torre (odometria visual)
Bian, 2019	Quadricóptero	PL-TD based visual SLAM	Full-HD	Torre	Identificação das torres e cálculo de odometria visual
Vina, 2018	Quadricóptero	LIDAR 2D detecção e cálculo de distância relativa	Não	Torre	Cálculo da posição da aeronave em relação ao centro da torre através dos dados de LIDAR planar.
Método proposto	Quadricóptero	Posicionamento visual através de AR-Tags	Full-HD	Torre ou Linha	Posicionamento de precisão para inspeções detalhadas

Fonte: O autor

encontrados.

Neste trabalho de pesquisa uma ferramenta desenvolvida para a implementação de aplicações em realidade aumentada chamada AR-Tag Alvar (VTT, 2017) é utilizada para se implementar o sistema de posicionamento de voo da aeronave e do posicionamento relativo entre os veículos. A utilização de etiquetas para implementação de sistemas de localização e navegação autônoma para robôs é uma solução simples e flexível para este tipo de problema. No caso específico de VANTs, são relacionados aqui os principais trabalhos que utilizam este tipo de ferramenta para criação de soluções de navegação e posicionamento em ambiente externo.

Um trabalho publicado no ano de 2016 apresenta o desenvolvimento de um *framework* para rastreamento e aterrissagem em um site, baseado em odometria visual utilizando uma câmera estéreo. A aeronave usa a odometria para encontrar os arredores do site de pouso e, quando atinge um raio de 5,0 m deste ponto, muda o controle para um algoritmo baseado na ferramenta *April Tag* (LABORATORY, 2018) para gerar dados de posição. O algoritmo de rastreamento foi testado em um ambiente externo, mas o algoritmo de pouso foi testado apenas

em simulação. As análises dos resultados são feitas usando dados de posição GPS regulares, o que traz alguma incerteza quanto à real precisão da proposta (XU; LUO, 2016).

O desenvolvimento de uma etiqueta circular e um algoritmo de posição para rastreamento e pouso automático de um VANT é descrito em um trabalho recente. A contribuição mais significativa deste trabalho é apresentar uma validação do sistema em períodos diurno e noturno. A técnica utiliza um algoritmo de decisão automática de limite de brilho para aumentar a confiabilidade de detecção da etiqueta. O artigo apresenta resultados de experimentos práticos para avaliar a precisão do algoritmo de posicionamento, executados em 6,0 m e 10,0 m de altura. O artigo não apresenta uma avaliação prática do rastreamento ou pouso de VANT autônomos (NGUYEN *et al.*, 2017).

Um artigo publicado no ano de 2017 de apresenta um sistema de recuperação de aeronaves de vôo autônomo do tipo asa fixa. Um automóvel convencional adaptado com uma rede plana fixada em seu teto é usado para capturar a aeronave em uma situação de pouso em movimento. Um grupo de etiquetas de tamanhos variáveis, baseadas na ferramenta *ARToolkit* (WASHINGTON, 2018), são colocados no topo do veículo logo abaixo da rede, buscando garantir a visibilidade para a aeronave durante o processo de pouso. Essas tags funcionam como um ajuste fino do sistema de controle da aeronave na aproximação final. Experimentos práticos realizando capturas reais foram executados, mostrando a viabilidade do método (MUSKARDIN *et al.*, 2017).

Em um trabalho publicado no ano de 2018 um grupo autores descrevem a implementação de um sistema de pouso autônomo para um quadricóptero em um robô móvel, baseado no uso de etiquetas de realidade virtual. Para lidar com o problema da precisão necessária ao pouso, que depende da altura do drone a cada momento, o sistema utiliza diversas etiquetas de tamanhos diferentes colocadas sobre o robô de solo. Dessa forma, para qualquer que seja a altura da aeronave, sempre haverá uma etiqueta totalmente visível para prover informações de posição e alimentar o sistema de controle de voo (ARAAR *et al.*, 2017).

A revisão apresentada nessa subseção demonstra que não foram propostos até o momento soluções de posicionamento de voo externo baseados na utilização de etiquetas visuais, como o proposto neste trabalho de pesquisa. Observou-se que a maior parte dos estudos que utilizam essa ferramenta focam na implementação de sistemas de posicionamento para pouso autônomo. O posicionamento de precisão e a navegação de aeronaves em ambiente externo não controlado apresentam desafios técnicos consideráveis, como variabilidade na iluminação,

vibração da aeronave e da câmera na captura das etiquetas, distância e altitude de voo grandes, por exemplo. Dessa forma, concluímos que existe uma lacuna na literatura para este tipo de aplicação. Tratando-se do foco específico desse trabalho de pesquisa, que é o posicionamento de precisão para operações de inspeção detalhada de torres através de sistemas colaborativos, essa lacuna se mostra ainda mais evidente. A tabela 3 realiza a comparação entre os trabalhos que utilizam etiquetas para criação de sistemas de posicionamento aplicados a VANTS para aplicações diversas, comparando-os com a proposição realizada neste estudo.

Tabela 3 – Comparação entre as propostas que aplicam etiquetas visuais para posicionamento e navegação de VANTS

Trabalho	Veículo	Aplicação	Câmera	Tipo de Etiqueta	Foco da Pesquisa
Xu, 2016	DJI Matrice 100	Pouso automático	PZT HD	April Tag	Seguimento e pouso automático em um veículo móvel
Nguyen, 2017	Quadricóptero	Pouso automático	Full - HD	Tag circular desenvolvida pelos autores	Posicionamento para navegação e pouso automático
Muskardin, 2017	Asa Fixa	Pouso automático	Allied Vision Prosilica GC1380	ARToolkit	Recuperação e pouso de asa fixa
Aouf, 2018	AR-Drone	Pouso automático	VGA	April Tag	Pouso automático em uma plataforma móvel
Método proposto	Bebop Drone	Posicionamento visual através de AR-Tags	Full-HD	AR-Tag Alvar	Posicionamento de precisão para voo externo

Fonte: O autor

2.5 SISTEMAS COLABORATIVOS ENTRE VANT E VTNT

Sistemas colaborativos entre veículos autônomos aéreos e terrestres são uma ferramenta extremamente versátil para a proposição de soluções em diversas áreas de aplicação. A característica específica de cada tipo de veículo oferece vantagens complementares que permitem a criação de sistemas robustos e flexíveis para a solução dos problemas desejados. A pesquisa na área de sistemas colaborativos apresenta diversas vertentes e aplicações, com diferentes graus de complexidade e inteligência computacional, desde o nível mais simples de complementação de informações até o nível mais complexo de aprendizado automático (RIZK *et al.*, 2019). Em um trabalho de revisão publicado no ano de 2010, um grupo de autores analisa especificamente o tema dos sistemas colaborativos VANT/VTNT, identificando nos trabalhos publicados três possíveis formas de cooperação: "Robos aéreos auxiliando robôs terrestres"; "Robôs terrestres auxiliando robôs aéreos"; e "Robôs aéreos e terrestres realizando tarefas cooperativas"(LACROIX;

BESNERAIS, 2010). Em um artigo de revisão do ano de 2013, os autores identificam as aplicações potenciais para sistemas colaborativos VANT/VTNT como: "Busca e seguimento de alvos"; "Vigilância de espaços"; "Mapeamento cooperativo"; e "Aplicações de inspeção de estruturas"; indicando já nesta época o potencial de uso dessas arquiteturas para aplicações como a proposta neste trabalho de pesquisa (NONAMI *et al.*, 2013). Em um outro artigo de revisão os autores identificam a possibilidade de utilização das arquiteturas cooperativas na solução de problemas de localização e seguimento de rotas dos veículos (CASKA; GAYRETLI, 2014).

Devido à proposta de posicionamento cooperativo investigada nesta pesquisa se basear na utilização de retro-alimentação de posição entre os veículos através de etiquetas visuais, analisamos neste ponto os trabalhos que utilizam este tipo de ferramenta em aplicações similares.

Um sistema cooperativo de retro-alimentação visual entre um quadricóptero AR-Drone e um veículo de solo Pioneer 3 é descrito em um trabalho do ano de 2012. O sistema implementa um algoritmo automático de desvio de obstáculos, onde o VANT captura imagens de um marcador pré-atribuído fixado no topo do obstáculo para reduzir a complexidade do processamento da imagem. Outra marca é fixada na parte superior do VTNT para fornecer uma pista visual para o algoritmo de cálculo da sua posição. O algoritmo de controle VTNT usa esses dados de posição relativa para fornecer a localização do robô em relação ao VANT durante todo o deslocamento. Quando o VTNT atinge um obstáculo, o algoritmo de detecção de colisão executa o desvio de rota necessário para conduzi-lo a um caminho ao redor da área de obstáculo (GARZÓN *et al.*, 2012).

Um trabalho publicado nesta área aplica uma etiqueta de realidade aumentada baseada na ferramenta *ArUco* (GARRIDO-JURADO *et al.*, 2014) colocada no topo de um VTNT para fornecer retro-alimentação visual de posição para um VANT. O VANT decola do corpo do VTNT e executa um acompanhamento autônomo do veículo terrestre. Um operador define o caminho do VTNT e o algoritmo autônomo mantém o VANT acima dele. No final do deslocamento, o VANT pousa no topo do VTNT. Os experimentos foram executados em ambiente externo, a 12,0 m de altura de voo (CANTELLI *et al.*, 2016).

Em um artigo recente, a proposta de uma arquitetura de exploração de ambiente colaborativa entre um quadricóptero e um veículo terrestre, que se deslocam em conjunto pelo ambiente realizando seu mapeamento. A localização relativa entre os dois veículos é realizada com a aplicação de etiquetas baseadas na ferramenta *AR-Tag Alvar* (VTT, 2017), na base do quadricóptero e na parte superior do VTNT. O quadricóptero utiliza uma câmera apontada para

baixo para capturar e processar a imagem da etiqueta do VTNT enquanto este utiliza uma câmera fixada em seu corpo na parte superior para capturar a imagem da etiqueta do quadricóptero. As informações são processadas em uma estação base de controle que executa o ROS e o pacote *ar_track_alvar* (HOOD *et al.*, 2017).

Uma arquitetura de seguimento de alvo cooperativa é proposta em um artigo publicado no ano de 2020. Um VTNT segue um objeto coberto com marcadores baseados em etiquetas AprilTag, enquanto um VANT segue este veículo de solo, usando outro marcador AprilTag colocado no topo do mesmo para obter sua posição. O documento não apresenta informações sobre a precisão da posição e parâmetros do mundo real (altura, velocidade de voo) (LIANG *et al.*, 2020).

A revisão da literatura demonstra que arquiteturas de navegação cooperativas baseadas no uso das etiquetas visuais são uma forma promissora para a implementação de soluções para navegação cooperativa em ambientes reais. No caso específico da proposta realizada neste trabalho de pesquisa, que é a proposta de um método colaborativo para a inspeção de estruturas de distribuição de energia elétrica, não foram identificados trabalhos similares até o momento, demonstrando a presença de uma lacuna na área de pesquisa para este tipo de aplicação. A tabela 4 apresenta a descrição resumida dos sistemas colaborativos VANT/VTNT baseados em realimentação visual por etiquetas e as suas aplicações, comparando-as com o método proposto em nosso trabalho de pesquisa.

2.6 DISCUSSÃO

A revisão da literatura possibilitou o entendimento amplo do estado da arte e a identificação das lacunas presentes nas pesquisas realizadas e publicadas até o momento. Dentre essas lacunas, foram definidos para a realização deste trabalho, três focos distintos a serem atacados: o estudo do processo de inspeção de torres do ponto de vista operacional e a proposição de um conjunto de parâmetros técnicos que possam servir de base para a proposição e construção de sistemas de inspeção baseados em VANTs autônomos; a proposição e avaliação de um método de posicionamento de voo para VANTs, baseado na utilização de um sistema de visão embarcado na aeronave que utiliza como referência uma etiqueta fixa em ambiente externo, e; a proposição e validação de um método cooperativo de posicionamento entre um VANT e um VTNT para a utilização em operações de inspeção detalhadas de postes e torres de distribuição de energia.

A abordagem destes três problemas específicos pode contribuir de forma significativa

Tabela 4 – Comparação entre os trabalhos que propõe arquiteturas cooperativas entre VANT/VTNT para aplicação em inspeções de sistemas de transmissão de energia

Trabalho	Veículos	Aplicação	Tipo de Etiqueta	Foco da Pesquisa
Garzon, 2012	AR-Drone e Pioneer P3	Seguimento de trajetória com desvio de obstáculo	Figuras geométricas	VTNT seguindo o VANT e recebendo posição de obstáculos para desvio automático
Cantelli, 2016	ASCTec FireFly e VTNT não especificado	Seguimento automático do veículo de solo pelo VANT	ArUco	Geração de posição relativa entre os veículos para descolamento cooperativo.
Hood, 2017	Bebop Drone e Kobuki TurtleBot 2	Deslocamento cooperativo entre os veículos	AR-Tag Alvar	Deslocamento em conjunto dos veículos com feedback de posição dada pelas tags em cada um deles.
Liang, 202	Veículos desenvolvidos pelos autores	Seguimento do VTNT pelo VANT	April Tag	O VANT segue o VTNT enquanto esse segue um alvo móvel
Método proposto	Bebop Drone e Pioneer P3	Posicionamento cooperativo entre os veículos	AR-Tag Alvar	Posicionamento cooperativo entre os veículos em ambiente externo, aplicado a inspeção de torres.

Fonte: O autor

com o estado da arte na área diretamente relacionada ao estudo, que é a de sistemas autônomos de inspeção de infra-estruturas de distribuição de energia, mas também para áreas mais amplas da disciplina de robótica, como a de sistemas posicionamento e navegação de precisão para VANTs em voos externos e a de operação cooperativa entre veículos terrestres e aéreos através de realimentação visual. Dessa forma pode-se observar que o método proposto e descrito neste trabalho possui um potencial significativo de inovação e contribuição, o que embasa a realização da pesquisa.

3 DESCRIÇÃO DO FERRAMENTAL TÉCNICO E COMPUTACIONAL UTILIZADO NO DESENVOLVIMENTO

O desenvolvimento deste projeto de pesquisa exigiu o uso de ferramentas diversas. Questões como a definição e especificação de sensores, proposta de arquitetura e construção da aeronave experimental e do veículo terrestre, definição das ferramentas computacionais, entre outras, são descritas neste capítulo para fornecer informações de base para as discussões realizadas nesta tese.

3.1 VEÍCULOS UTILIZADOS NO PROJETO

Para o desenvolvimento deste projeto foram utilizados dois VANTs e um VTNT, aplicados de acordo com a necessidade experimental. Um dos VANTs foi o modelo comercial Bebop Drone, de empresa Parrot e o outro uma aeronave montada baseada em peças avulsas. No caso do VTNT, a base de experimentação foi o modelo Pioneer P3 de empresa Generation Robots (ROBOTS, 2020).

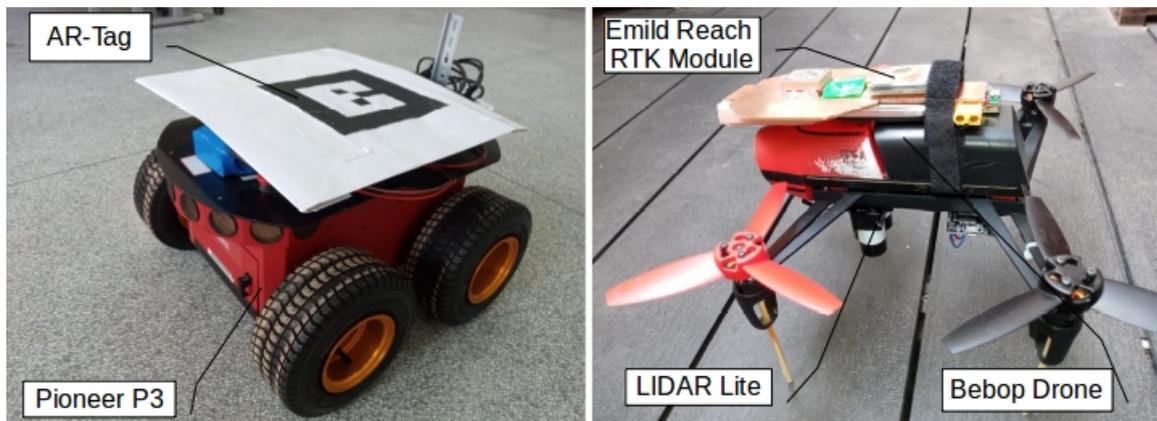
O modelo Pioneer P3 utilizado nesta pesquisa possui quatro rodas e é controlado por computador embarcado com um processador Intel Core i5, com 8GB RAM executando o sistema operacional Ubuntu 16.4 LTS e ROS Kinect. O veículo é compatível com o ROS e possui sensores ultrassônicos e um sensor Hokuyo URG-04-LX LIDAR fixado na parte frontal do seu chassi, permitindo a detecção de obstáculos. A navegação do veículo é baseada em um controlador PID implementado em C++, que recebe dados de posição atual através de um nó ROS (*ROS-Node*) e realiza a movimentação necessária para atingir um ponto determinado definido pelo programador. Este algoritmo é descrito no capítulo 4. A figura 6 a) mostra uma imagem deste veículo.

Uma parte dos experimentos realizados utilizou como base o Bebop Drone. Trata-se de um modelo comercial versátil e popular. Seu hardware controlador de voo é bastante robusto, e possibilita o desenvolvimento de códigos embarcados através de SDK própria (PARROT, 2019), o que torna sua utilização em pesquisas bastante interessante. Outra vantagem desse modelo é a possibilidade de utilizar o software de controle de voo Ardupilot através de upgrade do seu firmware (TEAM, 2019). O pacote Bebop-Autonomy (MONAJJEMI, 2015) oferece compatibilidade do VANT com o ROS, tornando simples sua integração em sistemas baseados nesta ferramenta.

Em termos de sensoriamento, o VANT possui posicionamento por GPS, um sensor de

fluxo óptico e um sensor ultrassônico na parte inferior da aeronave. Este modelo não possui sensoriamento anti-colisão. Uma desvantagem deste VANT é sua limitação de carga útil, por volta de 100 g, o que exige um planejamento de carregamento muito cuidadoso para a colocação de sensores e hardwares adicionais. Seu tempo de voo é em média de 10,0 minutos com a bateria em plena carga. Possui uma câmera com estabilização horizontal e vertical com lente *fish-eye* e resolução *Full-HD*. A figura 6 b) mostra uma imagem deste drone.

Figura 6 – a) Pioneer P3 com a AR-Tag posicionada em seu topo. b) Bebop drone com os sensores LIDAR Lite e Emild Reach RTK-GPS embarcados.



Fonte: O autor

Uma aeronave experimental do tipo quadri-rotor foi montada com base em um quadro de quadricóptero X de fibra de carbono Tarrot, que pode ser convertido em hexacóptero. A arquitetura utilizada foi baseada nos componentes mostrados na tabela 5. A figura 7 mostra a disposição dos sensores na aeronave. Os propulsores são baseados em hélices de fibra de carbono modelo 1045, ESC's de 30 A e baterias de 5200 mAh.

Tabela 5 – Tabela de componentes dos VANT montado para os experimentos

Componente	Quant.	Fabricante
Sensor HC-SR04	2	OSEPP Electronics
30A ESCS	4	Rctimer
Receptor D8R-XP	1	FrSKY
Módulo telemétrico	1	3DR
Computador de placa única Raspberry Pi 3	1	Newark
Controladora Navio2/Pixhawk	1	Emild
Reach RTK-GPS	1	Emild
Y- Lidar X4 360	1	YDLIDAR
Lepton 1.6 80x60	1	Flir
Câmera esportiva 4k	1	Action Sport

Fonte: O autor

Figura 7 – Foto do veículo aéreo montado e distribuição dos sensores.



Fonte: O autor

A controladora Navio2 da empresa Emild (EMLID, 2019b) é baseada no software de controle Ardupilot e possui uma configuração bastante robusta de sensoriamento, como IMU dupla e barômetro com resolução de 10,0 cm. É montada como um *shield* do computador em cartão Raspberry Pi, o que oferece uma grande vantagem para o desenvolvimento de aplicações embarcadas. O Raspberry Pi utiliza uma versão do Raspbian OS com ROS integrado, o que permite a criação de sistemas compatíveis com o ROS de forma simples. O hardware da controladora possui GPS integrado em seu circuito. A empresa oferece também um modelo de GPS-RTK chamado Reach, que pode ser facilmente integrado na controladora, permitindo a utilização deste tipo de tecnologia de posicionamento de alta precisão. A placa possui alimentação redundante com três entradas, uma através do módulo de potência do VANT, outra pela entrada USB e a terceira pela entrada auxiliar. Oferece interface UART, I2C, ADC, 12 saídas servo PWM, entrada PPM e S.Bus, além das entradas disponíveis na placa do Raspberry Pi. A controladora permite a utilização do pacote MAVROS, o que traz vantagem para o desenvolvimento de sistemas com base em estações terrestres de controle.

Para a configuração e controle desta aeronave, utiliza-se o software ArduPilot. O projeto

ArduPilot busca desenvolver um sistema de piloto automático baseado em código aberto e desenvolvimento cooperativo feito por desenvolvedores independentes, de forma cooperativa (ARDUPILOT, 2019). É atualmente o sistema aberto de controle de voo mais utilizado, sendo aplicado inclusive em controladoras de voo comerciais como a *Navio2*, *Pixhawk* e *Erle Brain*.

Esta aeronave foi montada com o objetivo de embarcar os diversos componentes e sistemas necessários à implementação da metodologia ao longo da continuidade deste estudo. Seu desenvolvimento e validação foi realizado durante dois anos, quando do estudo das ferramentas a serem utilizadas para a realização das pesquisas propostas, e compuseram um trabalho de mestrado de um membro do grupo de pesquisa em parceria com o autor desta tese (BERGER; WEHRMEISTER, 2019). Neste trabalho uma série de estudos foram realizados para permitir a concepção de uma aeronave de baixo custo para aplicação no desenvolvimento de ferramentas de inspeção autônoma de infra-estrutura de distribuição de energia elétrica.

Durante a realização dos experimentos apresentados nesta tese, utilizamos como base o Bebop Drone como principal aeronave, por questões de disponibilidade no momento da realização dos experimentos. Os resultados obtidos nestes experimentos serão posteriormente embarcados na aeronave montada, para compor a solução final de sistema de inspeção proposta pelo grupo de pesquisa.

3.1.1 Avaliação das ferramentas utilizadas para referência de posição durante os experimentos de voo com o VANT

Para a realização das medidas realizadas nos experimentos executados neste estudo, foi necessária a utilização de ferramentas para fornecer referências comparativas de posição para as medidas adquiridas. Para as medidas de altura, foi utilizado um sensor do modelo LIDAR LITE da empresa Garmin, embarcado na aeronave e apontando para o chão. Este modelo é construído na forma de "*pointer*", mas é possível utilizá-lo como sensor de varredura com a adaptação de um sistema mecânico de movimentação. Possui uma potência de laser de 1,3W, o que permite uma utilização em ambientes com alta incidência luminosa. Suas especificações são mostradas na figura 8.

O manual do sensor LIDAR lite indica um valor de acurácia de $\pm 2,5$ cm para distâncias menores que 5,0 m e 5,0 cm para distâncias maiores que esse valor. Experimentos foram realizados para avaliar a acurácia das leituras desse sensor durante a sua utilização em ambientes externos com iluminação natural sobre os alvos. Esses experimento apresentaram resultados

Figura 8 – Especificações técnicas do sensor LIDAR Lite.

	LIDAR-Lite v2 (Out of Stock)	LIDAR-Lite v3
		
General	Technical Specifications (collated by goembed.com)	
Power	4.75-5.5V DC Nominal, Maximum 6V	yes
Weight	PCB 4.5 grams, Module 22 grams with optics and housing	yes
Size	PCB 44.5 X 16.5mm (1.75" by .65")	yes
Housing	20 X 48 X 40mm (0.8" X 1.9" X 1.6")	yes
Current Consumption	<2mA @ 1Hz (shutdown between measurements), <100mA (continuous operation)	105mA, idle; 130mA, continuous
Operating	-20 to 60° C	yes
External Trigger	3.3V logic, high-low edge triggered	yes
Interface	I2C or PWM	yes
Range	0~40 meters	yes
Accuracy	+/- 2.5 cm at distances greater than 1 meter. Refer to operating manual for complete operating	yes
Update rate	1 - 500 Hz.	yes
Laser wave length/Peak power	905 nm/1.3 watts	yes
Beam divergence	4 m Radian X 2 m Radian	yes
Optical aperture	12 mm	12.5 mm
Resolution	1 cm	yes

Fonte: Garmin (GARMIN, 2020)

próximos ao desempenho indicado pelo fabricante, demonstrando que o sensor é adequado para uso em ambiente externo com iluminação solar direta, um fator importante para o arranjo experimental proposto neste estudo. Os resultados desses experimentos são apresentados na sessão 5.1.

A referência para o posicionamento horizontal da aeronave foi baseada na utilização de módulos de RTK-GPS do modelo Reach versão 1, comercializados pela empresa Emild (EMLID, 2019a). Este tipo de tecnologia utiliza a diferença de fase de sinais de GPS captados em dois receptores colocados em locais diferentes para calcular a correção do erro de posicionamento de um em relação ao outro. O primeiro receptor é colocado em uma posição fixa conhecida, proporcionando com isso o cálculo preciso da posição do segundo receptor, sendo este móvel.

A técnica tem capacidade de posicionamento preciso na ordem de um centímetro, desde que as condições mínimas de operação sejam respeitadas. Estas condições dizem respeito principalmente ao número de sinais de satélites recebidos por cada um dos módulos, com nível mínimo de potência e relação sinal/ruído adequados. Um trabalho de pesquisa publicado sobre esse tema apresenta uma análise da influência desses fatores na capacidade de posicionamento

preciso de voo de VANT's (ZIMMERMANN *et al.*, 2017). Um dos pontos levantados é que cada um dos módulos deve ter a cada instante no mínimo 4 satélites visíveis com boa relação sinal ruído para a obtenção do nível de precisão de centímetro para o módulo móvel. No artigo os autores comentam que condições ambientais como presença de construções, acidentes geográficos e similares podem inviabilizar o funcionamento adequado do sistema.

Os módulos Reach são montados em placas de tamanho e peso reduzido, o que facilita sua utilização em aeronaves de pequeno porte, além de terem um custo de aquisição relativamente baixo em relação a outros disponíveis no mercado. Esses módulos foram utilizados na parte experimental para prover uma referência de posição para a realização das medidas obtidas com a metodologia de posicionamento visual através de etiquetas de solo. A figura 9 mostra uma imagem do módulo.

Figura 9 – Imagem do módulo RTK-GPS Emild Reach.

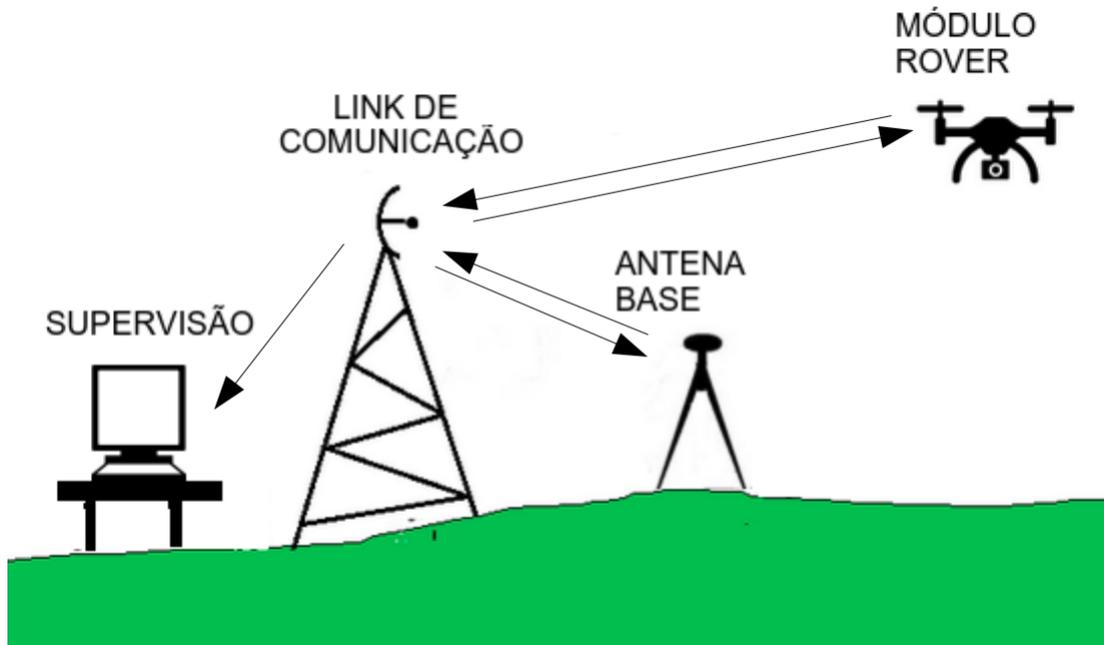


Fonte: Emild (EMLID, 2019b)

A figura 10 apresenta uma visão geral sobre a arquitetura do sistema RTK-GPS. Este sistema se baseia no cálculo da diferença de fase recebida entre os sinais no módulo *base* e no módulo *rover* para realizar a correção da acurácia de posição. Os módulos se comunicam entre si através do link de comunicação, que pode ser um link WIFI por exemplo, e trocam as informações de correção de posição. Cada um dos módulos executa uma aplicação web embarcada, que pode ser acessada pelo computador de supervisão para obtenção dos parâmetros de operação dos mesmos, como número de satélites visíveis e nível de recepção de cada um deles, posição da estação *base* e do módulo *rover* e relação sinal/ruído de cada sinal recebido, entre outras.

Os módulos podem fornecer três modos de saída de dados, o modo "*single*", que indica que não há correção da antena base no módulo *rover*, o modo "*float*" que indica uma precisão intermediária na ordem de uma dezena de centímetros e o modo "*fix*" que indica a máxima precisão, por volta de um centímetro. Na seção 5 apresentamos os experimentos que objetivam

Figura 10 – Visão geral dos componentes do sistema RTK-GPS.



Fonte: O autor

mencionar o desempenho desses módulos em condições de aplicação, tecendo as considerações necessárias para dar base à sua aplicação neste trabalho.

3.2 FERRAMENTAS COMPUTACIONAIS APLICADAS NO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Algumas ferramentas computacionais específicas foram utilizadas neste trabalho de pesquisa, para o desenvolvimento e teste dos sistemas propostos. Descrevemos neste ponto cada uma delas de forma a fornecer a base técnica necessária para o entendimento de sua aplicação nos arranjos experimentais.

O ROS é um *middleware* que permite a integração de diversas plataformas robóticas, componentes e sensores dentro de um *framework* comum, que utiliza um padrão para troca de mensagens entre tais componentes. É um sistema do tipo distribuído, onde um nó central concentra e repassa as informações entre os outros nós presentes na arquitetura implementada (ROS.ORG,). A sua filosofia é integrar diversos componentes de hardware e software desenvolvidos independentemente dentro de uma plataforma de comunicação e trabalho comum, baseada na criação dos chamados nós ROS. Um nó é basicamente um elemento que lê e publica informações dentro da arquitetura distribuída. Esta é a grande vantagem dessa arquitetura, permitindo

que qualquer novo componente, código ou algoritmo possa ser utilizado sem a necessidade de adaptação. Quando um código, por exemplo, é escrito para funcionar no ROS, suas entradas e saídas utilizam as mensagens padronizadas definidas pelo sistema, tornando transparente para o usuário o funcionamento. Este tipo de código é chamado de pacote ROS (*ROS Package*).

Diversos robôs, sensores e componentes utilizados na construção de sistemas robóticos são oferecidos com interface via ROS tanto pelos fabricantes e desenvolvedores quanto pela comunidade científica. Dessa forma, ao construir um sistema, pode-se utilizar o pacote disponibilizado para cada um dos componentes integrados ao mesmo para publicar mensagens que serão intercambiadas entre eles e os códigos de controle, tornando o desenvolvimento da solução flexível e eficaz.

O ROS possui bibliotecas de desenvolvimento nas principais linguagens de programação, como C++, Python e Lua. Na sua versão 1.0 somente trabalha com o sistema operacional Linux, mas a versão 2.0, trabalha nas plataformas Windows e Mac OS. Neste projeto utilizou-se a distribuição ROS Kinetic rodando em um sistema operacional Ubuntu Linux 16.4 instalado na máquina da estação base.

Alguns pacotes ROS específicos foram utilizados na implementação experimental dos sistemas desenvolvidos na pesquisa. Um elemento importante da arquitetura disponibilizada pelo ROS para o desenvolvimento de VANT's autônomos é o pacote *MAVROS*. Este pacote provê um driver de comunicação para diversos tipos de controladoras de voo e estações base de controle através de um protocolo de comunicação chamado *MAVLink Communication Protocol*.

Através do *MAVROS* a estação base e a controladora de voo podem trocar informações de leitura de sensores, comandos de controle, transferência de dados de missões, diagnóstico entre outras, permitindo o controle das condições de voo durante sua execução. O *MAVROS* trabalha com a maioria das controladoras de voo comerciais que oferecem compatibilidade com o ROS, como a *Pixhawk*, *APM*, *Navio2* e *Earle Brain*. Modelos de VANT's como o *Bebop Drone* também são compatíveis com este pacote.

A ferramenta *AR Track Alvar* faz parte de uma suíte desenvolvida e disponibilizada pelo *VTT Technical Research Centre of Finland Ltd* (VTT, 2017). Esta suíte oferece ferramentas para desenvolvimento de aplicações em realidade aumentada, com base na identificação e posicionamento de etiquetas para a criação destas aplicações. Conforme a página da empresa, a suíte é composta por três bibliotecas de desenvolvimento escritas em C++, *ALVAR Core*, *ALVAR Platform* e *ALVAR Tracker*. Neste projeto foi utilizado um pacote para a leitura das etiquetas

chamado *AR Track Alvar* (NIEKUM, 2019). A utilização do pacote é bastante simples, bastando executar o nó com uma configuração básica da câmera que será usada como sensor para as etiquetas dentro do ambiente de desenvolvimento ROS na máquina. O nó publica mensagens contendo a identificação de cada etiqueta e sua posição e orientação em relação à câmera nos três eixos. Este foi o pacote utilizado para a criação da base para a realização de alguns dos experimentos realizados nesta pesquisa.

Os módulos Reach RTK se conectam à estação base através de um link WIFI específico, na forma de um *hotspot*. O pacote Reach RS ROS Driver (EMLID, 2018) permite capturar os dados recebidos na estação e publicá-los em um nó ROS no formato *nav_msgs/NavSatFix*. O pacote republica as informações coletadas pelo módulo, facilitando sua utilização nos sistemas que trabalham com ROS.

O pacote Bebop Autonomy ROS (MONAJJEMI, 2015) é utilizado no projeto para realizar a troca de dados entre o Bebop e a estação base. É uma adaptação do software ARDroneSDK3 publicado pela empresa Parrot. Ele realiza a criação de nós para publicar os comandos de controle para a aeronave e sua câmera, e também para receber as informações dos sensores do VANT e as imagens capturadas. A transmissão de imagens é limitada pelo pacote a 640 x 368 - 30 Hz pixels, o que diminui a banda necessária mas também limita a qualidade das imagens no processamento de algoritmos de visão. A utilização deste pacote é interessante por fornecer uma interface simples com a aeronave, permitindo o rápido desenvolvimento de aplicações utilizando-se o Bebop Drone. Dessa forma a experimentação pode ser feita rapidamente para posteriormente ser embarcada em uma aeronave com maior poder de processamento e sensoriamento, por exemplo.

Alguns dos experimentos realizados utilizaram-se de vídeos gravados pelo VANT para o processamento do posicionamento da aeronave em voo. Como o pacote AR-Tag Alvar realiza a leitura de um tópico ROS, onde as imagens capturadas são publicadas para seu processamento foi necessária a geração de um tópico com as imagens do vídeo gravado. Para isso utilizou-se o pacote *Video Stream Open-CV* (PFEIFFER, 2019). Este pacote gera uma câmera virtual com os parâmetros pré-definidos no *script* de inicialização, publicando a imagem em um nó do tipo */image_raw*.

3.3 DISCUSSÃO

Este capítulo apresentou de forma sucinta a descrição do ferramental técnico e lógico utilizado na construção dos experimentos realizados na pesquisa e também para formar a base

estrutural que será utilizada na continuidade dos estudos para a implementação final do método proposto. É importante ressaltar que muitas das ferramentas e técnicas estudadas e desenvolvidas ao longo desta pesquisa não foram descritas e incluídas neste texto por não estarem diretamente ligadas aos objetivos propostos na tese. Apesar desse fato, tais ferramentas foram fundamentais para a pesquisa e a continuidade desta, com a consequente complementação da metodologia aqui proposta para compor uma solução aplicável em condições reais de utilização.

O trabalho de desenvolvimento deste ferramental técnico foi bastante longo e exigente, tomando uma boa parte do tempo total dos trabalhos relacionados aos estudos que resultaram nesta tese. O domínio das técnicas e ferramentas, a avaliação e experimentação sistemática de sensores e componentes, a montagem, testes e validações de arquiteturas de veículos e aeronaves e os diversos testes de campo realizados para a avaliação de soluções específicas são também uma parte deste trabalho, executada a várias mãos, que deve ser aqui evidenciada.

4 DETALHAMENTO DOS PROCEDIMENTOS E ORGANIZAÇÃO METODOLÓGICA UTILIZADA NO TRABALHO

O processo de inspeção autônoma de torres e postes de distribuição de energia exige a resolução de diversos problemas práticos relacionados às tarefas executadas. O estudo realizado levou a identificar que a proposta de um sistema cooperativo de inspeção para este tipo de aplicação tem um grande potencial de oferecer soluções viáveis para os desafios encontrados neste tipo de processo. Dentre os desafios para se implementar um sistema deste tipo encontra-se a construção de um método de posicionamento de precisão para os veículos utilizados durante a execução das tarefas. O posicionamento de precisão é um problema crítico para o funcionamento adequado deste tipo de solução.

O presente trabalho propõe um método de posicionamento de precisão entre um VTNT e um VANT, baseado em realimentação através da utilização de etiquetas visuais e processamento de imagens. A solução se baseia na fixação de uma etiqueta deste tipo no topo do VTNT para possibilitar o cálculo da posição relativa entre os dois veículos, de forma que cada um possa servir de referência para o outro em um determinado momento da operação, criando assim um sistema de referência cooperativo entre ambos.

O posicionamento do VTNT no solo, quando parado, busca garantir que a câmera do VANT mantenha um link visual com o etiqueta colocada no seu topo durante todo o voo. Neste caso, se por algum motivo o módulo RTK-GPS embarcado na aeronave venha a exibir um mau funcionamento, o sistema visual oferece uma referência de posição redundante para a aeronave. Esta forma de operação incrementa a segurança do voo durante a inspeção. Os dados de posicionamento são fornecidos ao VTNT pelo sistema de referência da etiqueta, ou seja, seu referencial é relativo à câmera embarcada no VANT. O VTNT recebe esses dados de posição através da ferramenta *AR-Track Alvar* e os utiliza para alimentar seu sistema de controle de navegação durante os deslocamentos. Dessa forma podemos perceber que o sistema de posicionamento dos veículos é realmente cooperativo, pois a cada momento um deles serve de referência de posição para o outro.

O desenvolvimento deste trabalho de pesquisa foi proposto de forma a possibilitar a implementação de cada componente e realizar sua avaliação e validação através dos experimentos necessários, para posteriormente integrá-los à solução definitiva. Cada uma dessas partes foi desenvolvida dentro do paradigma de implementação do *Robot Operating System - ROS*, de

forma a possibilitar composição simples e rápida da solução final.

O primeiro passo do estudo foi a realização da definição técnica dos parâmetros de operação da solução, baseado em informações levantadas com auxílio de engenheiros da empresa Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL, que trabalham diretamente na área de inspeção. Através desse estudo foi possível definir os parâmetros a serem respeitados na implementação do método proposto, bem como entender como o comportamento dos veículos deve ser programado.

O segundo passo refere-se à construção do ferramental necessário para a implementação das soluções propostas. Esta etapa da pesquisa foi longa e trabalhosa, mas essencial para a construção da base sobre a qual os experimentos do estudo foram executados. Entre as ações realizadas estão a avaliação dos componentes para a composição da arquitetura física da solução proposta, teste de sensores e componentes, implementação e integração de algoritmos, montagem e teste da aeronave experimental, entre outras muitas.

Após a definição dos parâmetros e construção do ferramental, foi possível iniciar o planejamento e execução dos experimentos de validação do método proposto. Primeiramente foram realizados os experimentos que visaram comprovar a capacidade de se utilizar a ferramenta baseada na etiqueta para prover dados robusto de posição para o voo da aeronave, um ponto crítico para a solução proposta. Nesta etapa diversos experimentos foram executados, com o objetivo de avaliar a influência das condições de voo na detecção e medida de posição da aeronave utilizando-se da etiqueta fixa no solo.

Vencida esta etapa, com a confirmação da viabilidade da técnica de posicionamento proposta, chegamos ao passo final que foi verificar a capacidade de se controlar o deslocamento do VTNT utilizando-se dos dados provenientes da captura pelo VANT da etiqueta colocada em seu topo. Esta avaliação comprovou a viabilidade de se integrarem todos os componentes para a construção do método de posicionamento e inspeção cooperativa objetivado na pesquisa. Detalhamos a seguir o planejamento metodológico de cada etapa experimental.

4.0.1 Análise da operação de inspeção e definições dos parâmetros do projeto

O primeiro passo metodológico no desenvolvimento da pesquisa foi a realização do estudo detalhado das particularidades das tarefas realizadas e a definição dos parâmetros operacionais que devem ser respeitados na concepção da solução. A análise operacional da inspeção deve levar em conta os problemas e defeitos que devem ser visualizados na estrutura e componentes

durante a inspeção. Essa informação é importante para a proposição da arquitetura de captura de imagens a ser embarcada na aeronave experimental. Exemplos de ocorrências deste tipo presentes nas estruturas são mostrados na figura 11.

Figura 11 – Defeitos comuns encontrados nos componentes e estruturas das torres.



Fonte: APTEL (RESENDE, 2017)

O levantamento de informações necessário ao entendimento das particularidades do processo de inspeção detalhada através de VANT contou com o apoio de engenheiros da área de inspeção de linhas de distribuição de energia da empresa Companhia Paranaense de Energia Elétrica - COPEL, que forneceram além das informações técnicas e conceituais, uma significativa contribuição pela sua experiência de campo no uso de VANTs para inspeção de torres de distribuição. Foram programadas e realizadas uma série de entrevistas com estes profissionais, que forneceram informações essenciais ao completo entendimento do problema. É importantíssimo mencionar aqui o essencial apoio desses profissionais para a realização dos testes de campo realizados no site de treinamento da empresa, gentilmente cedido em várias ocasiões para a realização dos experimentos, sempre com o acompanhamento e orientação dos mesmos.

Através das entrevistas realizadas, foi possível definir os parâmetros operacionais que devem ser considerados para a realização de um processo de inspeção baseado em VANT:

- As alturas das torres de distribuição variam de 10,0 m à 100,0 m de altura, dependendo do

local geográfico e da tensão de trabalho.

- As torres são instaladas em diversos tipos de locais, incluindo áreas urbanas densas, áreas rurais, regiões de serra, regiões de praia, entre outros.
- Em muitas situações o acesso à torre é inviável com o equipamento, exigindo que o VANT decole e seja operado de uma distância que pode chegar a ultrapassar 1,0 km em algumas situações específicas.
- O voo próximo das torres é arriscado e complexo, principalmente quando se utilizam aeronaves com poucos recursos de sensoriamento específicos para esta condição para detecção e desvio de obstáculos. Devido à distância e à falta de referência visual para o operador durante o voo, o posicionamento da aeronave torna-se difícil, podendo causar acidentes.
- O tempo de voo necessário para a inspeção de uma torre individual é em média igual a 30 minutos. A durabilidade da bateria de aeronaves comerciais geralmente permite voos com duração menor que essa, exigindo o pouso e a troca da mesma para completar o processo.
- O sensoriamento utilizado na inspeção é baseado em câmeras full-HD e câmeras térmicas, quando disponíveis. A inspeção é feita filmando-se a estrutura e posteriormente verificando-se as imagens em busca de defeitos ou má conservação nos componentes.

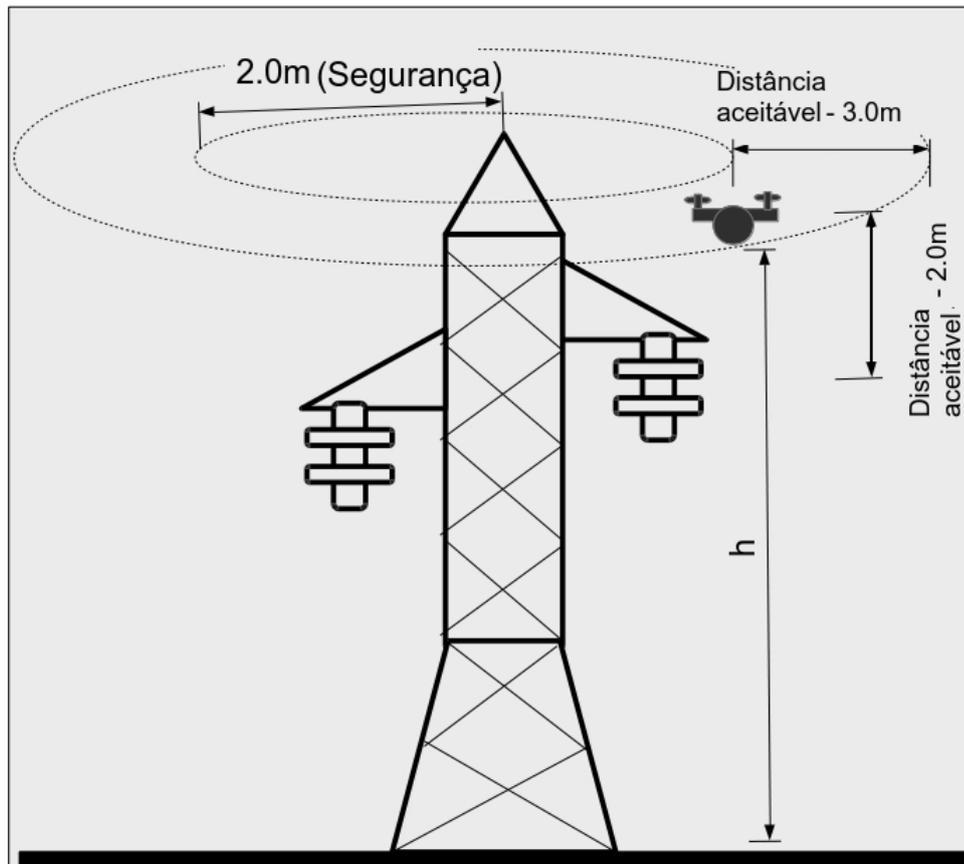
Os parâmetros técnicos de voo de uma aeronave durante as inspeções também foram definidos nas entrevistas, e são apresentados na tabela 6. Considerando as informações levantadas nesta análise, foi possível determinar os parâmetros de operação necessários para a operação de um VANT autônomo para inspeção detalhada. A figura 12 mostra a definição das distâncias a serem respeitadas pelo VANT durante um voo de inspeção, baseados nas informações levantadas nas entrevistas.

Tabela 6 – Parâmetros técnicos definidos para a inspeção através do VANT

Parâmetro	Valor
Distância recomendada para aquisição de imagens com câmera sem zoom óptico	4.0 ± 1.0 m
Distância de segurança crítica da aeronave em relação à obstáculos	2 m
Velocidade média de deslocamento durante a inspeção	0.5 m/s
Velocidade média de deslocamento durante o seguimento de condutores	1.5 m/s
Ângulo de voo da aeronave ao redor da torre durante a inspeção	360 °
Altura típica das torres e postes	20—50 m

Fonte: O autor

Figura 12 – Parâmetros de voo autônomo para inspeção da torre com VANT.



Fonte: O autor

4.1 ORGANIZAÇÃO, IMPLEMENTAÇÃO E INTEGRAÇÃO DAS FERRAMENTAS FÍSICAS E LÓGICAS NECESSÁRIAS AO DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

O estudo detalhado do problemas relativos ao método de inspeção forneceu as informações necessárias para a construção de uma aeronave experimental para a implementação do método proposto. A arquitetura desta aeronave foi concebida levando-se em conta questões como estabilidade de voo, autonomia, hardware embarcado adequado ao processamento, sensores para detecção de colisão e medida de distância da aeronave aos objetos presentes no entorno, etc. Nesta etapa também foram definidos, configurados e testados os outros veículos utilizados no estudo, que foram o Pioneer P3 e o Bebop Drone, além de implementadas as ferramentas de interface e troca de informação e controle necessárias para a operação dos mesmos. A descrição da arquitetura da aeronave, do Bebop Drone e do Pioneer P3 são realizadas na seção 3.1.

Vencida a etapa de especificação e construção dos veículos utilizados na pesquisa, passamos à fase de implementação das ferramentas físicas e lógicas necessárias à implementação dos testes dos algoritmos e métodos propostos no trabalho de pesquisa. A implementação

dessas ferramentas é essencial para a construção dos procedimentos experimentais necessários à avaliação das soluções propostas. Entre elas podemos citar a definição do sistema referencial para os veículos, teste dos pacotes necessários à integração dos componentes da arquitetura no ROS, a avaliação dos módulos RTK-GPS em condições de voo da aeronave, a programação de códigos de parametrização dos dados transmitidos pelos nós durante os experimentos, a criação e validação dos códigos de controle autônomo para o VTNT, entre outros.

4.1.1 Definição e testes da arquitetura do sistema RTK-GPS

O sistema de posicionamento utiliza os módulos RTK-GPS Emild Reach para fornecer referências de posição durante os experimentos realizados com o uso da etiqueta de solo, pelo VANT em voo. Dessa forma foram propostos experimentos para avaliar o desempenho dos módulos utilizados. Os experimentos foram planejados para avaliar a estabilidade de leitura de posição dos módulos em condições de aplicação, com a antena base instalada no site de experimentação e o módulo embarcado na aeronave.

Entre as condições avaliadas, estão a forma adequada de instalação dos módulos tanto na antena base quanto no VANT e a capacidade dos módulos de manter a acurácia do posicionamento em condições ambientais diversas, como dias nublados e ensolarados, por exemplo. A influência de obstáculos que causam sombreamento nas antenas tanto da base quanto do VANT também foi avaliada experimentalmente. Através destes experimentos pudemos garantir que o RTK-GPS funcionasse corretamente durante os experimentos realizados. Os experimentos são apresentados na seção 5.2.

4.1.2 Sistema referencial utilizado no método de posicionamento cooperativo

Para que o sistema de controle de posição baseado na realimentação por etiqueta visual colocada no topo do VTNT trabalhe adequadamente, é necessário definir o ponto de origem do sistema de coordenadas para os veículos e executar as transformações de referência necessárias entre eles. A antena base do RTK-GPS é definida como a origem do sistema de referência. É importante definir com precisão a posição desta antena em relação às estruturas de distribuição de energia antes de iniciar o processo de inspeção, pois os dados de distância relativa entre os veículos e estas estruturas são o que garante o posicionamento correto durante os deslocamentos, evitando a possibilidade de uma colisão. No caso de uma aplicação real, esta definição pode ser

realizada utilizando-se os dados georreferenciados da posição das torres presentes no banco de dados da empresa de energia.

O sistema referencial do VTNT é definido de acordo com a posição do VANT durante o processo de inspeção e, portanto, representa um sistema referencial móvel. A cada deslocamento, o VTNT busca a posição diretamente abaixo do VANT, considerando-o como o ponto (0,0), num processo de "siga o líder". Este arranjo busca garantir que o veículo terrestre permaneça abaixo do VANT durante todo o voo, mantendo a visibilidade da etiqueta para servir como um ponto de referência redundante para o caso do RTK-GPS falhar.

Considerando que o sistema de referência da etiqueta está associado ao eixo da câmera do VANT, a orientação relativa aos veículos quando não se encontram alinhados entre si, cria um deslocamento de posição da etiqueta capturada pela câmera em relação ao eixo de coordenadas da origem do sistema de referência. A figura 13 representa os eixos da origem na base RTK, os eixos do VTNT e os eixos da câmera VTNT. Para corrigir a posição rotação e posição relativa entre o eixo principal e as leituras realizadas utilizando-se da etiqueta, é necessário corrigir o *offset* (Δx , Δy) e o ângulo de rotação horizontal da câmera θ . A correção do *offset* é feita calculando-se a diferença entre a posição do VTNT tomada através da leitura da etiqueta e a posição lida através do módulo RTK-GPS embarcado na aeronave, como apresentado na equação 1.

$$[\Delta x, \Delta y] = Posicao_RTK(x,y) - Posicao_Etiqueta(x,y) \quad (1)$$

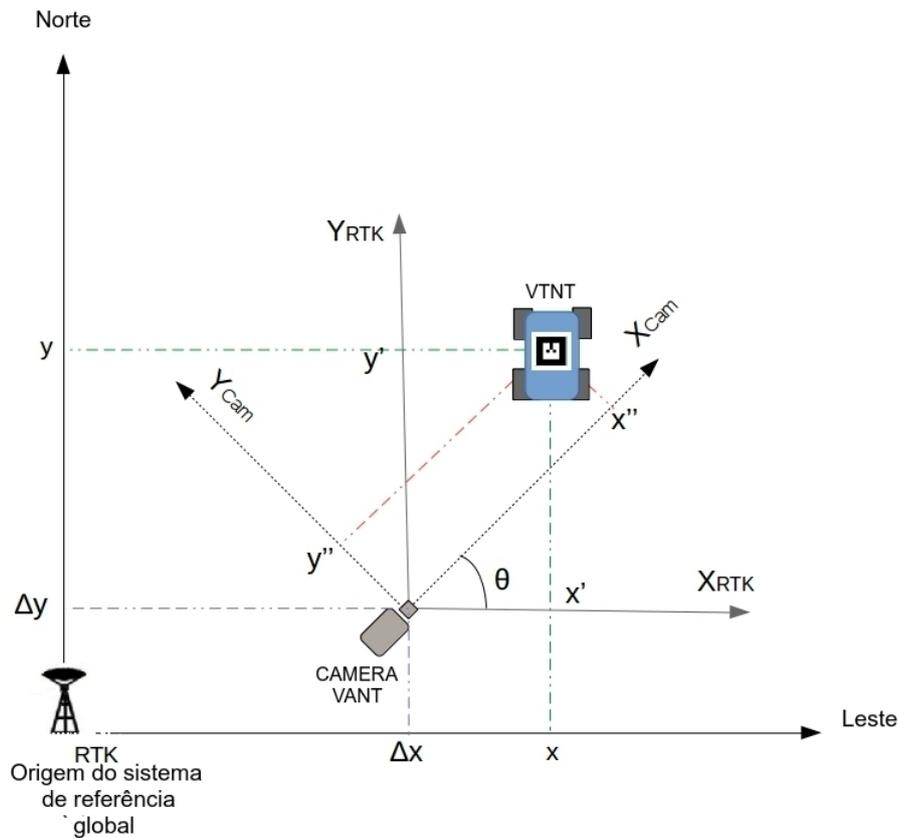
A rotação é corrigida através de uma transformação padrão de rotação matricial em 2D, utilizando-se do ângulo horizontal medido da etiqueta pelo sistema da AR-Tag. A equação 2 apresenta as transformações de referência realizadas.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x'' \\ y'' \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta x \\ \Delta y \end{bmatrix} \quad (2)$$

4.1.3 Descrição da arquitetura de troca de informações via ROS

A metodologia proposta foi implementada com base na comunicação entre os agentes através de nós ROS. Para isso foram utilizados tanto pacotes específicos disponibilizados pela comunidade ROS, como também desenvolvidos os pacotes adicionais necessários para a captura,

Figura 13 – Correção de referências do sistema de posicionamento baseado na etiqueta visual.



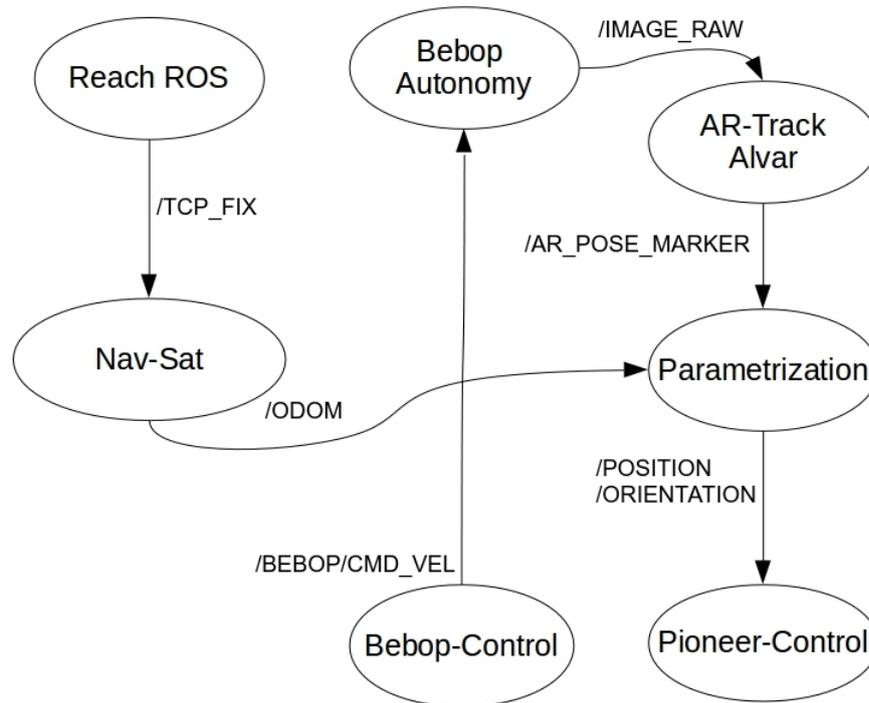
Fonte: O autor

adequação e publicação das informações. A figura 14 mostra a arquitetura de nós do sistema durante os experimentos.

A estação base é responsável por concentrar as informações recebidas do VANT e do RTK-GPS, calculando a posição de cada um dos veículos e também enviando as informações de controle para o deslocamento do VTNT. Essa abordagem foi tomada para minimizar o tempo de implementação e testes. Em versões futuras a proposta é embarcar o processamento nos veículos para diminuir o tempo e o custo computacional devido aos atrasos de transmissão das mensagens, deixando a estação base apenas com a responsabilidade de definição e envio dos comandos operacionais da inspeção. Isto pode ser facilmente realizado devido à arquitetura distribuída baseada no paradigma *publisher/subscriber* do ROS, bastando que o hardware embarcado na aeronave possua poder de processamento suficiente para a realização das tarefas necessárias.

Os módulos Emild Reach instalados na antena base e no VANT se conectam com a estação base através de um link Wi-Fi próprio, trocando as informações necessárias para a correção da posição do módulo *rover* através de um software próprio. A informação da posição

Figura 14 – Descrição simplificada da arquitetura de troca de mensagens via ROS.



Fonte: O autor

corrigida do módulo *rover* é recebida através de um pacote chamado *Reach ROS*, que trata e publica a informação em um tópico */tcp_fix*.

Um nó chamado *Navsat* recebe as informações publicadas no tópico */tcp_fix* e transforma a informação para um formato de odometria, necessário ao sistema de navegação, publicando os dados em um tópico chamado */odom*. Essa informação é recebida pelo nó chamado */parametrization*, responsável pelo tratamento e conversão de posições recebidas tanto do RTK-GPS quanto do pacote AR-Track Alvar, publicando uma informação de posição e orientação nos tópicos */position* e */orientation*. O código de controle *PID* do Pioneer P3 recebe essa informação e a utiliza para calcular seu deslocamento ao ponto desejado.

O pacote AR-Track Alvar recebe as imagens capturadas pela câmera do Bebop Drone através do tópico */bebop/image_raw* publicado pelo nó *Bebop Autonomy* e calcula a posição relativa da etiqueta em relação ao VANT, publicando o valor em um tópico do tipo *ar_track_alvar_msgs/AlvarMarkers*.

O controle do Bebop é realizado através do nó chamado *bebop_control* que envia comandos de velocidade através do tópico */bebop/cmd_vel* para a aeronave, controlando sua movimentação. Nos experimentos realizados para avaliação do sistema de posicionamento, o

controle da aeronave foi feito de forma manual, pela complexidade de manutenção do voo em ambiente sujeito a vento e também às instabilidades geradas pela grande quantidade de carga adicional embarcado sobre ela (Módulo RTK-GPS, antena, bateria de alimentação do módulo e sensor LIDAR LITE). O sistema de controle autônomo de voo deve ser testado futuramente na aeronave montada no projeto, que possui uma carga útil maior e também mais estabilidade em voo externo por seu tamanho e potência de motores.

4.1.4 Descrição do sistema de controle autônomo do VTNT

O controle de posição do VTNT é feito por meio de um controlador *PID* executado em um computador embarcado no veículo, utilizando como entrada as variáveis de posição e orientação do VTNT, com base nos valores recebidos pelo nó */parametrization* através da leitura da etiqueta colada em seu topo. Os nós ROS criados para a leitura e escrita dos dados são mostrados na figura 15

Figura 15 – Trecho do código fonte mostrando os nós ROS.

```
// ROS publisher and subscriber initialization
ros::init(argc, argv, "quaternion");
ros::NodeHandle n;

ros::Subscriber sub2 = n.subscribe("/parametrization", 1000, subCallback);
ros::Publisher pub1 = n.advertise<geometry_msgs::Twist>("/Pioneer", 1000);

ros::spinOnce();
ros::Rate loop_rate(10);

if (ros::ok())
{
  geometry_msgs::Twist msg;
  // Control loop
```

Fonte: O autor

Para realizar o controle de posição, calcula-se o erro de orientação do veículo em relação ao ponto de destino, utilizando-se da leitura da etiqueta, conforme demonstrado na equação 3,

$$Ang_rotacao = arctg(Pos_inicial(x,y) - Pos_destino(x,y)) - Ang_etiqueta \quad (3)$$

onde *Ang_rotacao* é o ângulo de rotação necessário para o robô se alinhar ao ponto de destino, *Ang_etiqueta* é o ângulo de orientação do veículo lido através da etiqueta, *Pos_inicial* a posição atual do veículo e *Pos_destino* a posição de destino desejada. O cálculo do ângulo de

rotação serve de entrada para o controlador *PID* de correção de orientação inicial, cujo código é mostrado na figura 16.

Figura 16 – Trecho do código fonte do controle de orientação inicial.

```
// Begin the orientation correction
double secs =ros::Time::now().toSec();
while ((abs(erroorie) > tolerance_orie) // While the orientation error is bigger than tolerance, repeats the loop
{
//ROS_INFO("Correcting orientation");
secs =ros::Time::now().toSec();

difpos_y = posdesejada[1]-position_y;
difpos_x = posdesejada[0]-position_x;
angle = atan2(difpos_y,difpos_x);
erroorie = angle-yaw_angle;

printf("posição: %f\n",position_y);

Corr_OrP = KorieP*erroorie; // Proportional correction calculation.
Corr_OrI = KorieI *erroorie * delta; // Integral correction calculation.
Corr_OrD = KorieD * ((last_erroorie - erroorie)/delta); //Differential correction calculation.

msg.angular.z = Corr_OrP + Corr_OrI + Corr_OrD;
publ.publish(msg);

ros::spinOnce();
last_secs = secs;
last_erroorie = erroorie;
last_dist = dist;

interation++;
}
```

Fonte: O autor

Este controle primeiramente alinha o Pioneer P3 com o ponto de destino, até a orientação atingir um erro dentro do limite de tolerância determinado de 2,0 graus.

Após chegar à tolerância desejada, o controle sai do loop inicial e entra no loop de controle de deslocamento linear. Inicialmente o código realiza o cálculo do erro linear, que é uma distância euclidiana entre a posição atual do VTNT e o ponto desejado, como mostrado na equação 4,

$$Erro_linear = \sqrt{[Pos_inicial(x) - Pos_destino(x)]^2 + [Pos_inicial(y) - Pos_destino(y)]^2} \quad (4)$$

onde *Erro_linear* representa a distância linear entre a posição atual do robô e ponto de destino. O valor do erro serve de entrada para o controle de posição do VTNT. Neste loop de controle, o controlador corrige tanto a posição quanto a orientação até que o Pioneer P3 atinja o ponto final desejado, com uma tolerância de 0,2 m. O código deste controle é mostrado nas figuras 17 e 18.

Figura 17 – Primeira parte do código de controle de deslocamento.

```
// Begin the position correction
while ((dist > tolerance_pos)) // While position and orientation errors are not less than tolerance, repeats loop
{
  ROS_INFO("Moving the Pioneer");
  secs = ros::Time::now().toSec();
  delta = secs - last_secs;
  difpos_y = posdesejada[1]-position_y;
  difpos_x = posdesejada[0]-position_x;
  angle = atan2(difpos_y,difpos_x);

  //Position PID control

  erroorie = angle-yaw_angle;
  Corr_OrP = KorieP*erroorie;
  Corr_OrI = KorieI *erroorie * delta;
  Corr_OrD = KorieD * ((last_erroorie - erroorie)/delta);

  msg.angular.z = Corr_OrP + Corr_OrI + Corr_OrD;
  publ.publish(msg);
}
```

Fonte: O autor

Figura 18 – Segunda parte do código de controle de deslocamento.

```
//Position PID control

dist = sqrt(pow(posdesejada[0]-position_x,2)+pow(posdesejada[1]-position_y,2));

Corr_PosP = abs(KposP*(dist));
Corr_PosI = abs(KposI * dist *delta);
Corr_PosD = abs(KposD *((last_dist - dist)/delta));

//printf("difw: %f\n",erroorie);
//printf("w: %f\n\n",yaw_angle);
printf("distancia: %f\n\n",dist);

msg.linear.x = Corr_PosP + Corr_PosI + Corr_PosD;
publ.publish(msg);

loop_rate.sleep();
ros::spinOnce();
last_secs = secs;
last_erroorie = erroorie;
last_dist = dist;
}
```

Fonte: O autor

O controle PID possui como parâmetros de ganho os seguintes valores: Parcela P:0,5; Parcela I: 0,01; Parcela D: 0,01.

4.2 PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE POSICIONAMENTO DE VOO DO VANT

O sistema de posicionamento do VANT com base nas etiquetas de solo é uma das inovações apresentadas nesse trabalho. A experimentação deste método de posicionamento é um ponto crítico para o sistema cooperativo proposto, uma vez as leituras de posição tomadas pelo VANT utilizando-se da etiqueta colocada no topo do VTNT servem de referência auxiliar para o caso do sistema primário baseado no RTK-GPS falhar.

Uma parte considerável da experimentação prática realizada na pesquisa buscou com-

provar a viabilidade desse método de posicionamento, tendo em vista que não foram encontrados trabalhos que tivessem realizado ainda esta experimentação. O uso de uma etiqueta no solo como referencial, com a captura pela câmera do VANT para a realização dos cálculos de posição, apresenta vários desafios práticos que devem ser ultrapassados para que o sistema funcione adequadamente.

Primeiramente, considerando que a ferramenta *AR-Track Alvar* utilizada para a implementação da medida de posição através da etiqueta não foi projetada para o aplicação em posicionamento de objetos em ambientes externos e à grandes distâncias, foram realizados experimentos para avaliar questões como a iluminação solar sobre a etiqueta, o tamanho da mesma, resolução da câmera e sua influência nos erros de posicionamento de medida em condições controladas. Além dessas questões, o voo da aeronave cria uma movimentação na câmera que gera uma mudança de posição da etiqueta na imagem capturada, e conseqüentemente uma mudança da posição calculada em relação à mesma. Assim sendo, foram realizados experimentos para avaliar como essa movimentação afeta o cálculo das medidas e influencia no erro de posição obtido. Para isso o RTK-GPS foi embarcado no Bebop Drone para servir de *ground truth* para as medidas e diversos voos foram realizados com as imagens da etiqueta no solo e os dados de posição armazenados para processamento posterior. Esses experimentos são detalhados na seção 5.3, e confirmaram a viabilidade do método de posicionamento proposto.

4.3 PROPOSIÇÃO E AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA DE POSICIONAMENTO E NAVEGAÇÃO DO VTNT ATRAVÉS DE REALIMENTAÇÃO VISUAL

O último componente necessário para a implementação do sistema de posicionamento cooperativo é a validação do posicionamento do VTNT através do uso da etiqueta colocada em seu topo com realimentação visual utilizando-se as imagens capturadas pelo VANT. Nesse método de posicionamento o veículo aéreo serve de referência móvel para o deslocamento do VTNT, que busca se posicionar sempre abaixo do VANT em seus deslocamentos.

Dentre os desafios apresentados para a implementação desse método, temos a questão de se garantir que a geração de dados pela leitura da posição da etiqueta colocada no topo do VTNT é suficientemente correta e robusta para permitir ao algoritmo de controle de navegação trabalhar adequadamente. Um experimento realizado em ambiente de laboratório, descrito na seção 5.4, apresenta os resultados promissores com relação ao controle de navegação do VTNT.

Finalizando, foram realizados experimentos para avaliar como o voo do VANT afeta o

controle de do VTNT em ambiente externo. Nestas condições temos uma mudança de posição e orientação do VANT durante o voo, o que causa uma mudança nos eixos de leitura da posição da etiqueta colocada no topo do VTNT, dificultando o cálculo correto da posição relativa entre os veículos. Além disso a alteração de luminosidade sobre a etiqueta, devido ao experimento ser realizado em ambiente externo, apresentou influência significativa no desempenho do algoritmo de leitura das etiquetas e cálculo de posição, e portanto tiveram que ser devidamente avaliadas. Os experimentos realizados com este fim também são apresentados na seção 5.4.

4.4 DISCUSSÃO

Neste capítulo foram apresentados de forma sistemática os experimentos realizados e o planejamento metodológico do trabalho, de forma a oferecer uma visão global sobre como a pesquisa foi conduzida e também como os resultados obtidos constroem a base da solução proposta.

Foram demonstrados também na descrição metodológica uma parte essencial, que demandou um grande esforço e tempo dedicado, de estudo e implementação de ferramentas e componentes necessários ao desenvolvimento do trabalho de pesquisa, com a proposição e construção da aeronave experimental, teste de sensores, dos algoritmos de controle e comunicação com o Pioneer P3 e com o Bebop Drone e demais elementos necessários à implementação das soluções propostas. Este trabalho inicial, feito a várias mãos, permitiu a construção de uma base ferramental essencial para a implementação da pesquisa realizadas até o momento, e também dos trabalhos futuros previstos pelo grupo de pesquisa.

Vale ressaltar aqui que o trabalho apresentado nesta tese, de proposta do método de posicionamento cooperativo, é parte de um trabalho de pesquisa mais extenso, que deverá ser desenvolvido para a implementação de um sistema completamente funcional de inspeção detalhada de torres e postes de distribuição de energia elétrica. Diversos problemas práticos ainda devem ser atacados para a finalização do mesmo, e a busca de soluções para tais problemas são previstas nos trabalhos futuros propostos.

5 EXPERIMENTOS, RESULTADOS E DISCUSSÃO

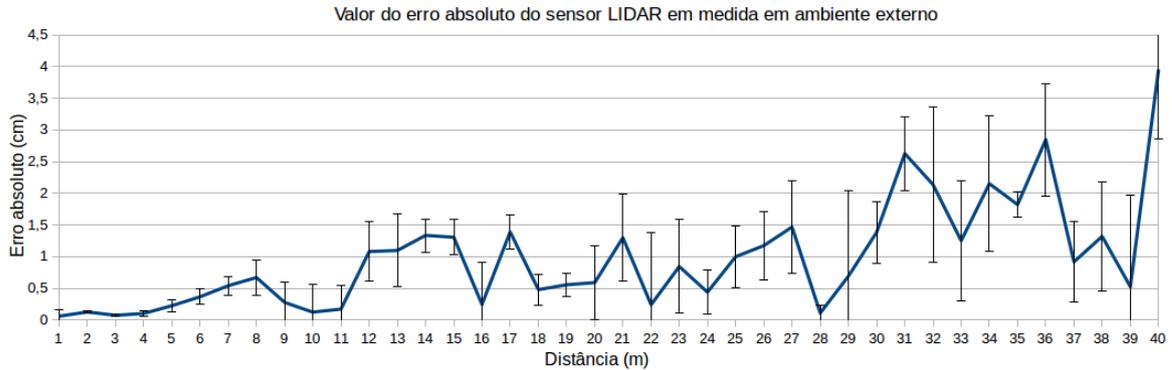
A avaliação do método proposto foi realizada através de experimentos executados em laboratório em ambientes externos similares àqueles onde acontecem as inspeções de torres e postes. Estes experimentos tiveram como objetivo avaliar o desempenho individual das técnicas, ferramentas, sensores e demais elementos necessários para a composição da metodologia proposta.

5.1 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO SENSOR LIDAR NAS MEDIDAS REALIZADAS EM AMBIENTE EXTERNO NÃO CONTROLADO

O sensor LIDAR Lite foi utilizado como *ground truth* para as medidas de altura de voo do VANT nos experimentos realizados nesta pesquisa. Um experimento foi montado para avaliar o desempenho do sensor nas leituras de distância tomadas em ambiente externo com iluminação solar direta. O sensor foi montado em uma base e ligado a um notebook que captura as leituras através de uma interface com uma placa de desenvolvimento Arduino UNO. Uma placa larga foi colocada à sua frente em um suporte móvel para servir de alvo. Uma fita métrica de 40,0 m de comprimento e erro de 0,5 cm foi usada como referência de medida para as leituras. O sensor foi alinhado com a placa utilizando-se de um apontador LASER. O obstáculo foi posicionado em frente ao sensor, em um intervalo de distância entre 1,0 m e 40,0 m. A placa foi afastada em intervalos de 1,0 m e as medidas foram tomadas para cada uma das distâncias. Os experimentos foram realizados em duas condições de iluminação diferentes, a primeira com o alvo colocado na sombra e a segunda com o alvo colocado sob iluminação solar direta. Um número médio de 200 amostras foi capturado para cada distância, e o processo foi repetido três vezes. O resultado dos testes com o alvo colocado na sombra é mostrado na figura 19. O sensor apresentou uma resposta com erro menor que 10,0 centímetros e desvio padrão menor que 5,0 centímetros para as maiores distâncias avaliadas.

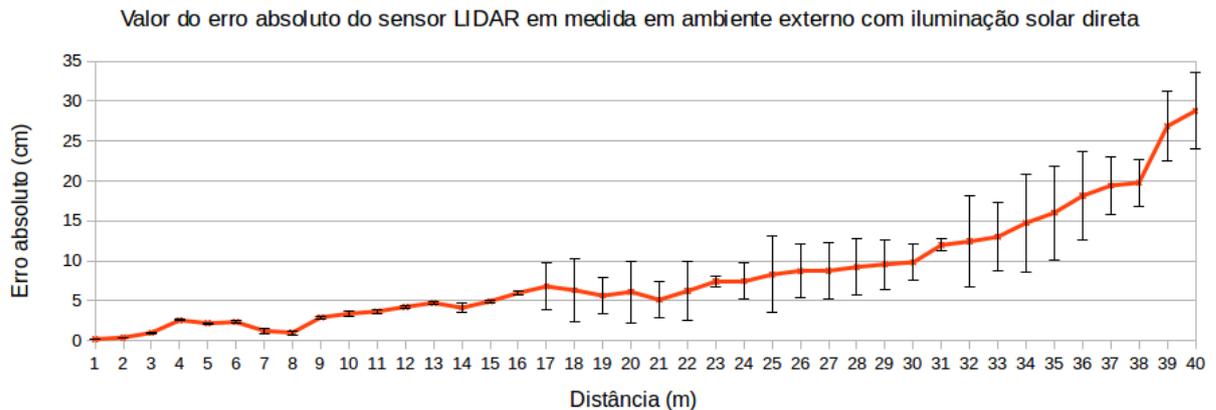
Os valores medidos com o alvo sob iluminação solar direta são mostrados na figura 20. Neste caso a medida de erro aumentou a partir dos 17,0 metros, bem como o desvio padrão das medidas. Isto indica que a potência de LASER refletida pelo alvo para o sensor sofre a influência da luz ambiente para distâncias elevadas. Apesar desta variação, os valores das medidas para distâncias menores que 15,0 metros foram considerados adequados para as necessidades do

Figura 19 – Erro absoluto e desvio padrão das medidas de distância do sensor LIDAR Lite em ambiente externo com iluminação solar indireta do alvo.



Fonte: O autor

Figura 20 – Erro absoluto e desvio padrão das medidas de distância do sensor LIDAR Lite em ambiente externo com iluminação solar direta do alvo.



Fonte: O autor

arranjo experimental proposto.

5.2 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA SOLUÇÃO DE RTK-GPS

O sistema GPS-RTK utilizado neste trabalho foi baseado do modelo Reach da empresa Emild (EMLID, 2019b). Os experimentos realizados buscaram avaliar o seu desempenho nas condições de utilização. O objetivo dos testes realizados foi a avaliação da estabilidade das medidas de alta precisão do módulo durante o voo, buscando identificar as condições necessárias para que o sistema mantenha a acurácia a nível de centímetro durante a operação de inspeção. Os testes foram realizados em uma chácara na região de Piraquara-PR. Este local apresenta uma boa abertura horizontal, sem prédios altos ou construções que possam interferir na recepção dos sinais dos satélites pelos módulos RTK-GPS. Na parte lateral do campo existem algumas árvores altas, que podem gerar sombreamento sobre os módulos dependendo da posição dos

mesmos. Os voos realizados evitaram a proximidade dessa área. As medidas foram feitas em um dia de céu limpo, com o módulo embarcado no Bebop Drone. A antena foi montada em uma base tripé, com um plano terra formado por uma placa cobreada de 30,0x20,0 cm. A figura 21 mostra uma imagem do site de testes com a antena base. O módulo móvel foi montado em uma placa cobreada de 20x20 cm.

Figura 21 – Detalhe do local de testes com a instalação da antena do GPS-RTK.



Fonte: O autor

Antes de iniciar os testes de voo, foram realizadas avaliações sobre questões práticas da instalação da antena base para melhoria da recepção de sinal e consequente manutenção da acurácia no estado "*fix*". Para isso a antena foi montada no tripé na altura recomendada pelo fabricante e o módulo *rover* foi colocado em um suporte de 2,0 m de altura, permanecendo estático durante todo este experimento. Após o tempo necessário para estabilização da recepção do satélite, observou-se que os módulos não foram capazes de manter o modo de operação em "*fix*" durante 10,0 minutos iniciais do experimento. Neste tempo os modos de operação do RTK-GPS ficaram oscilando entre *float* e *fix*, passando a maior parte do tempo no modo *float*, mesmo com o céu limpo e com o módulo *rover* estático, sem a presença de obstáculos que pudessem interferir na recepção dos sinais de satélites.

Observando o nível de recepção dos satélites durante este tempo, observou-se que um número pequeno de canais apresentavam níveis adequados para a manutenção do modo *fix*. Observou-se em vários experimentos realizados ao longo do tempo e que esta pesquisa foi

desenvolvida, que os módulos Reach apresentam desempenho significativamente dependente das condições de recepção de sinais de satélite, o que influencia diretamente na obtenção de dados de alta precisão. Locais com obstáculos que causam sombreamento na antena, como àqueles em áreas urbanas por exemplo, inviabilizam a manutenção do modo de alta precisão para este equipamento. Trabalhos publicados na literatura relatam que este tipo de problema é comum para os equipamentos baseados em correção de posição por cálculo de sinais diferenciais (GNSS), pelo fato da técnica exigir um número mínimo de 5 sinais de satélites da mesma constelação e com nível de relação sinal ruído e intensidade de recepção adequados para permitir o cálculo da correção de posição (ZIMMERMANN *et al.*, 2017).

A figura 22 mostra uma captura de tela que apresenta a recepção dos sinais para o experimento realizado, indicando o baixo nível de recepção obtido com o arranjo inicialmente utilizado. Nesta figura as barras representam o nível de recepção dos sinais dos diversos satélites que estão visíveis no momento, onde as barras verdes representam valores de sinal com nível adequado de recepção para o cálculo das correções de posição. Pode ser verificado que no módulo BASE, mostrado na figura 22 a), apenas três dos satélites possuem um nível de recepção de sinal adequado, sendo apenas dois da mesma constelação (G19 e G30), o que inviabiliza o cálculo das correções necessárias para obtenção de posicionamento de alta precisão. No caso do módulo embarcado na aeronave, mostrado na figura 22 b), apenas um dos satélites apresenta nível de recepção adequado.

Várias tentativas de arranjo foram testadas para tentar minimizar este problema. A solução encontrada foi aumentar a altura do suporte da antena base para 6,0 m, o que garantiu um nível de recepção de sinal adequado para a operação, e a manutenção do modo *fix* de operação, necessário aos experimentos.

Uma vez definida a montagem adequada dos módulos, iniciaram-se os experimentos de voo para verificar a influência da movimentação do VANT na recepção dos sinais do módulo *rover* e a capacidade de manutenção do modo *fix* necessário para os experimentos de posicionamentos realizados posteriormente com a etiqueta de solo. Uma série de 10 voos foram realizados, em alturas variando entre 5,0 m e 30,0 m, dentro da área do local de testes, buscando manter uma distância adequada para a recepção do sinal de WIFI do ponto de acesso no módulo *rover* durante o voo. A figura 23 mostra a captura de tela de três voos realizado neste experimento. Os pontos em verde são os pontos que apresentam o módulo no estado *fix* e os pontos amarelos são os pontos do estado *float*.

Figura 22 – Captura de tela mostrando baixo número de satélites com nível adequado de sinal recebido para o funcionamento dos módulos RTK-GPS. Barras vermelhas: Potência de recepção abaixo do limiar aceitável. Barras verdes: Potência de recepção acima do limiar adequado.



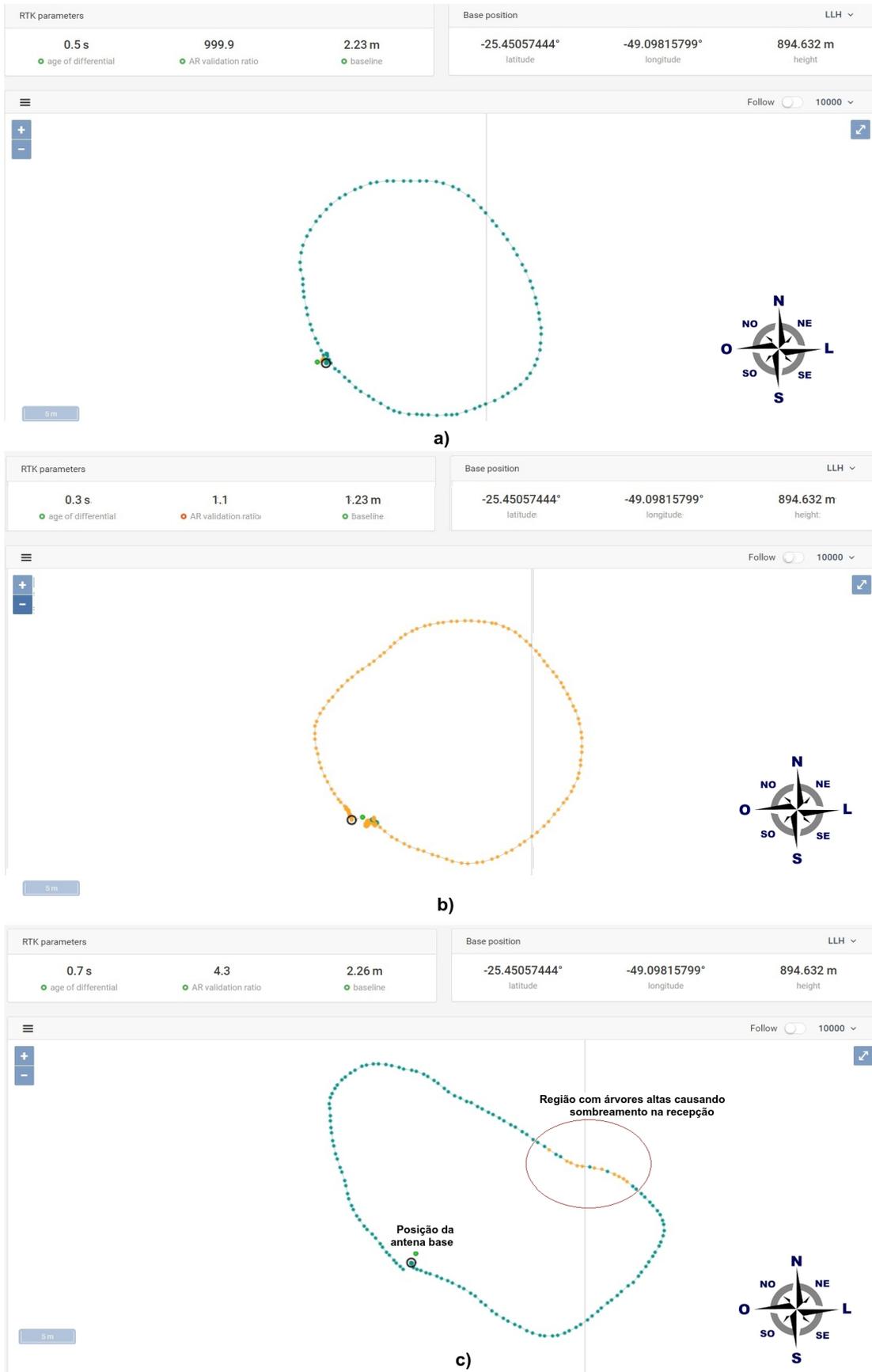
Fonte: O autor

Como pode se observado na figura 23 (a), a estabilidade da leitura do modo *fix* permaneceu constante durante 100% do voo, mesmo com variação de velocidade e altura do VANT durante o trajeto. Este voo aconteceu com o céu aberto, a uma altura aproximada de 10,0 m e sem que o VANT se deslocasse próximo às árvores altas que ficam ao lado do terreno.

A captura de tela do gráfico representado na figura 23 (b) mostra uma situação particular, quando o voo foi realizado em um momento em que o céu estava nublado, o que influenciou significativamente na qualidade de recepção de sinais do módulo *rover*. Esta mesma situação foi observada em outros voos, em dias diversos. Nestas condições o RTK-GPS não foi capaz de manter a operação no modo *fix*, permanecendo no modo *float* durante todo o trajeto. Este resultado indica que a presença de nuvens em quantidade significativa pode afetar o desempenho dessa ferramenta, o que deve ser levado em consideração nos experimentos de coleta de dados de posicionamento.

Os módulos utilizados para a realização dos experimentos nesta pesquisa são de uma versão descontinuada pela empresa, por serem os que se encontram disponíveis entre os equipamentos do laboratório de pesquisa. Uma nova versão encontra-se disponível para venda atualmente, sendo provável que alguns problemas de desempenho tenham sido aperfeiçoados. Outros módulos deste tipo também são oferecidos no mercado, com valores de aquisição e características técnicas similares.

Figura 23 – Gráficos de voo com captura de posição pelo RTK-GPS (Pontos verdes - GPS no modo Fix; Pontos amarelos - GPS no modo Float;). (a) voo com recepção em modo FIX durante todo o trajeto. (b) voo com recepção em modo FLOAT durante todo o trajeto. (c) voo com recepção no modo FLOAT causado por sombreamento da antena do VANT em uma área específica.



Fonte: O autor

Por fim, o gráfico representado na figura 23 (c) mostra que existe a ocorrência de uma perda do modo de operação *fix* em uma região do voo realizado próximo à uma série de árvores altas que funcionam como obstáculo para a recepção dos sinais do módulo *rover*. Estes obstáculos causam uma perda nos sinais recebidos dos satélites e conseqüentemente a diminuição da acurácia das medidas. Esta situação pode ocorrer também, por exemplo, na inspeção de uma torre de distribuição de energia, pois sua estrutura pode servir de obstáculo para a recepção dos sinais pelo módulo da aeronave. Isto indica que o uso do sistema de posicionamento baseado apenas no Emild RTK-GPS para o voo autônomo pode não oferecer robustez suficiente para a garantia da operação adequada do sistema, devendo-se portanto utilizar outras ferramentas de geração de posição para garantir a segurança de operação da aeronave durante o processo de inspeção.

5.3 AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO MÉTODO DE POSICIONAMENTO DE VOO EXTERNO PARA O VANT UTILIZANDO-SE ETIQUETAS DE SOLO

Um dos problemas fundamentais a ser atacado para a validação do método cooperativo proposto é a capacidade do VANT se localizar durante o voo através da leitura e processamento da etiqueta colocada no topo do VTNT, quando este encontra-se parado em um ponto com coordenadas conhecidas. Em um primeiro experimento, a acurácia das medidas tomadas da etiqueta com o uso da ferramenta *AR Track Alvar* foi avaliada, com o objetivo de se verificar como os parâmetros de distância, tamanho da etiqueta e resolução da câmera influenciam no valor do erro das medidas. A segunda parte dos experimentos, realizada com o VANT em voo acima de uma etiqueta fixa no solo, avaliou como as condições desse voo influenciam na robustez da detecção e medida de posição obtidas utilizando a etiqueta como referência. Foram realizados experimentos para medição de acurácia de posição horizontal, vertical e de orientação horizontal do VANT nestas condições.

5.3.1 Avaliação da acurácia de medidas de distância e orientação da ferramenta AR-Track Alvar em ambiente externo e a grandes distâncias

A ferramenta AR-Tag Alvar foi originalmente desenvolvida para prover informações de posição e localização de elementos físicos para sua reprodução em ambientes de realidade aumentada. A ferramenta foi projetada para trabalhar com uma câmera estática, em ambiente com

iluminação controlada e a pequenas distâncias. Esta ferramenta e outras similares começaram a ser utilizadas em aplicações de robótica devido a facilitarem a implementação de algoritmos de estimação de posição.

Apesar da literatura apresentar alguns trabalhos que utilizam a ferramenta em aplicações de posicionamento em ambiente externo, não foi possível encontrar-se dados da acurácia de suas medidas com diferentes iluminações, utilizando etiquetas grandes, capturadas à distâncias acima de 10,0 m. Dessa forma foram propostos experimentos para investigar o comportamento desta solução nas condições descritas, utilizando-se a câmera do Bebob drone para capturar as imagens a serem processadas pelo pacote AR-Track Alvar. O Bebob foi colocado em uma posição fixa sobre uma mesa de forma a apontar para a etiqueta colocada à sua frente em um tripé móvel. Uma fita métrica de 40,0 m de comprimento com uma precisão de 0,5 cm foi fixada no solo para servir como referência de distância. As imagens foram gravadas na memória do drone em resoluções de 1280×720 pixels e 1920×1080 pixels para processamento posterior, e também transmitidas através do pacote *Bebop Autonomy* para a estação base, na resolução padrão de 640×368 pixels. Foram utilizados dois tamanhos de etiqueta, de 90,0 cm e de 50,0 cm para as medidas. As seguintes condições de iluminação foram avaliadas: (a) luz solar direta, (b) luz solar indireta, (c) dia nublado e (d) luz solar direta com sombreamento parcial da etiqueta.

As medidas foram tomadas a cada metro, em três repetições, com captura de aproximadamente 20 segundos de imagens, fornecendo 400 amostras aproximadamente para cada posição/repetição. Durante a captura, as imagens transmitidas para a estação base através do pacote *Bebop Autonomy* foram processadas pelo pacote *AR-Track Alvar* e seus dados salvos em um arquivo tipo texto. Para as imagens em alta resolução gravadas no Bebob, o processamento foi realizado posteriormente, utilizando-se do pacote *Video Stream Open-CV*, que publica as imagens de um vídeo gravado em um nó ROS, permitindo assim que fossem lidas pelo pacote *AR-Track Alvar*. As medidas calculadas pela ferramenta foram também gravadas em arquivos texto para análise posterior. Os dados foram organizados, categorizados, para a realização dos cálculos estatísticos necessários. Valores de média, desvio padrão foram calculados utilizando respectivamente as equações 5 e 6. A tabela 7 apresenta os resultados do experimento.

$$\overline{Erro} = \sum_{i=1}^n \frac{p - p'}{n} \quad (5)$$

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{p - p'}{n - 1}} \quad (6)$$

onde,

\overline{Erro} — Média do erro,

σ — Desvio padrão do erro,

p' —valor lido,

p —valor real,

n —número de amostras.

O cálculo do intervalo de confiança (I.C=95%) para as amostras foi calculado utilizando-se a equação 7.

$$I.C = \overline{Erro} \pm 1,96 \times \sigma \quad (7)$$

Os resultados confirmam a viabilidade da utilização das etiquetas e o pacote *AR-Track Alvar* para a medida de posicionamento nas condições de aplicação desejadas. Os valores do erro de posição foram menores que 5% do valor da distância total avaliada em cada rodada do experimento, indicando que esta ferramenta pode prover as medidas de forma adequada aos experimentos propostos para a validação do método.

Em relação à variação das condições de iluminação, as medidas dos erros e desvios padrão para as condições testadas (iluminação solar direta, indireta e em dias nublados) não demonstraram variação estatisticamente significativa entre si, demonstrando que estas condições não influenciam significativamente na correta detecção e cálculo da posição da etiqueta.

Uma situação particular ocorre com a iluminação parcial da etiqueta, ou seja, quando uma sombra incide sobre uma parte da figura. Neste caso o algoritmo de visão apresenta erros no processamento da imagem, pela dificuldade de identificar adequadamente a figura, devido à diferença de brilho em partes da imagem da mesma causada pelo sombreamento. Nestas condições a ferramenta apresenta um grande número de leituras do tipo "*out-of-range*", demonstrando que esta é uma condição crítica para o bom funcionamento da mesma.

É importante frisar que a ferramenta utilizada nos experimentos foi escolhida pela sua versatilidade e pela facilidade de implementação, de forma a permitir uma avaliação inicial da técnica. Soluções alternativas podem ser testadas para minimizar esse problema específico,

Tabela 7 – Tabela descrevendo as medidas de erro absoluto das leituras de posição horizontal, vertical e orientação, tomadas da etiqueta em ambiente externo à longas distâncias

Resolução (Pixels)	Distancia (m)		2.0		6.0		10.0		14.0		18.0		22.0		
	Tamanho da Tag (cm)		Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	Média	D.P	
640x368	50.0	Erro Horiz.	0,15*	0,03	0,23	0,06	0,37	0,10							
			0,11**	0,02	0,22	0,04	0,38	0,12							
			0,12***	0,02	0,25	0,07	0,35	0,08	o.r	-	o.r	-	o.r	-	
	50.0	Erro Vert.	0,10	0,02	0,25	0,05	0,37	0,09							
			0,08	0,01	0,23	0,05	0,34	0,09	o.r	-	o.r	-	o.r	-	
			0,13	0,01	0,27	0,08	0,33	0,07							
	50.0	Erro Orient.	0,51	0,02	0,83	0,09	1,20	0,12							
			0,47	0,03	0,85	0,08	1,22	0,09	o.r	-	o.r	-	o.r	-	
			0,44	0,05	0,85	0,10	1,21	0,13							
90.0	Erro Horiz.	0,05	0,01	0,12	0,02	0,23	0,06	0,35	0,10	0,46	0,12				
		0,07	0,01	0,13	0,03	0,25	0,05	0,33	0,11	0,49	0,24	o.r	-		
		0,09	0,02	0,14	0,03	0,26	0,07	0,32	0,10	0,52	0,23				
90.0	Erro Vert.	0,08	0,01	0,13	0,03	0,22	0,07	0,28	0,10	0,35	0,12				
		0,07	0,02	0,11	0,02	0,19	0,05	0,31	0,12	0,36	0,14	o.r	-		
		0,07	0,02	0,13	0,02	0,18	0,06	0,32	0,14	0,33	0,15				
90.0	Erro Orient.	0,32	0,01	0,51	0,07	0,93	0,09	1,31	1,11	1,52	1,20				
		0,28	0,01	0,53	0,05	1,10	0,08	1,42	1,09	1,61	1,33	o.r	-		
		0,37	0,01	0,48	0,04	1,03	0,09	1,37	1,20	1,49	1,35				
1280x720	50.0	Erro Horiz.	0,08	0,01	0,18	0,02	0,26	0,04	0,43	0,33					
			0,09	0,01	0,19	0,01	0,28	0,04	0,51	0,38					
			0,11	0,02	0,16	0,03	0,27	0,05	0,46	0,41	o.r	-	o.r	-	
	50.0	Erro Vert.	0,09	0,02	0,17	0,01	0,26	0,07	0,55	0,45					
			0,11	0,01	0,18	0,03	0,29	0,06	0,59	0,54	o.r	-	o.r	-	
			0,07	0,01	0,18	0,01	0,30	0,04	0,57	0,51					
	50.0	Erro Orient.	0,34	0,01	0,51	0,07	0,77	0,19	1,24	0,38					
			0,36	0,01	0,48	0,06	0,81	0,21	1,34	0,42	o.r	-	o.r	-	
			0,38	0,03	0,53	0,05	0,79	0,23	1,30	0,45					
90.0	Erro Horiz.	0,03	0,01	0,10	0,01	0,18	0,02	0,22	0,05	0,38	0,09				
		0,04	0,02	0,12	0,03	0,21	0,01	0,23	0,07	0,41	0,07	o.r	-		
		0,06	0,01	0,11	0,03	0,22	0,01	0,25	0,09	0,36	0,06				
90.0	Erro Vert.	0,06	0,01	0,10	0,01	0,16	0,03	0,23	0,04	0,31	0,10				
		0,05	0,01	0,10	0,01	0,19	0,04	0,29	0,03	0,35	0,11	o.r	-		
		0,06	0,03	0,09	0,01	0,15	0,03	0,21	0,06	0,34	0,14				
90.0	Erro Orient.	0,28	0,01	0,37	0,03	0,44	0,08	0,75	0,17	1,66	1,00				
		0,25	0,02	0,39	0,03	0,43	0,08	0,99	0,22	1,72	0,96	o.r	-		
		0,19	0,02	0,39	0,02	0,40	0,06	0,83	0,12	1,75	1,07				
1920x1080	50.0	Erro Horiz.	0,04	0,01	0,06	0,01	0,09	0,02	0,12	0,05					
			0,05	0,01	0,05	0,02	0,08	0,02	0,15	0,06	o.r	-	o.r	-	
			0,08	0,01	0,07	0,02	0,11	0,01	0,16	0,06					
	50.0	Erro Vert.	0,05	0,03	0,08	0,01	0,12	0,03	0,17	0,05					
			0,08	0,01	0,07	0,01	0,12	0,04	0,21	0,08	o.r	-	o.r	-	
			0,09	0,01	0,09	0,02	0,14	0,03	0,19	0,07					
	50.0	Erro Orient.	0,21	0,02	0,39	0,03	0,45	0,08	0,97	0,10					
			0,24	0,02	0,38	0,03	0,49	0,08	0,98	0,09	o.r	-	o.r	-	
			0,29	0,02	0,37	0,02	0,49	0,09	1,01	0,12					
90.0	Erro Horiz.	0,03	0,01	0,03	0,01	0,09	0,02	0,18	0,05	0,28	0,07	0,36	0,12		
		0,04	0,02	0,04	0,02	0,08	0,02	0,18	0,06	0,32	0,09	0,39	0,13		
		0,06	0,01	0,04	0,02	0,12	0,03	0,21	0,08	0,25	1,10	0,44	0,16		
90.0	Erro Vert.	0,02	0,01	0,05	0,01	0,08	0,04	0,10	0,07	0,27	0,09	0,39	0,12		
		0,02	0,02	0,04	0,01	0,09	0,04	0,13	0,05	0,29	0,08	0,43	0,15		
		0,04	0,02	0,06	0,01	0,07	0,03	0,15	0,09	0,29	0,09	0,40	0,10		
90.0	Erro Orient.	0,15	0,01	0,22	0,02	0,49	0,08	0,64	0,12	1,33	0,90	1,45	1,00		
		0,10	0,01	0,23	0,03	0,51	0,09	0,71	0,10	1,42	1,12	1,53	0,98		
		0,12	0,02	0,25	0,03	0,50	0,10	0,66	0,10	1,27	1,08	1,48	1,15		

Erro Horiz: Erro absoluto de posição horizontal (m).

Erro Vert: Erro absoluto de posição vertical (m)

Erro Orient: Erro absoluto de orientação (graus)

D.P: Desvio Padrão -- [o.r]: Fora de alcance (Out-of-range)

* Medida com iluminação solar direta – ** Medida com iluminação solar indireta – * Medida em dia nublado

Fonte: O autor

baseadas por exemplo na criação de etiquetas ou sinalizadores próprios para utilização em ambiente externo, com iluminação ativa.

A resolução da câmera apresentou influencia significativa na acurácia das medidas realizadas. O algoritmo de processamento de imagem implementado pela ferramenta *AR Track Alvar* realiza a extração das bordas do quadrado preto em relação ao fundo branco para calcular a distância e a orientação da câmera em relação à figura da etiqueta. Neste caso, quanto maior for a resolução da câmera, mais preciso será o cálculo deste limite, principalmente para longas distâncias. Tomando como exemplo a distância de 10,0 m com a etiqueta de 50 cm e calculando o intervalo de confiança de 95%, através da equação 7, para as amostras nas três resoluções, temos os seguintes valores, apresentados na tabela 8.

Tabela 8 – Comparação do intervalo de confiança para as medidas de erro horizontal, vertical e de orientação, para uma distância de 10,0 m utilizando resoluções diferentes

Resolução (pixels)	640 x 368	1280 x 720	1920 x 1080
Intervalo de confiança erro horizontal (m)	0,37 +/- 0,20	0,26 +/- 0,12	0,18 +/- 0,09
Intervalo de confiança erro altura (m)	0,42 +/- 0,18	0,25 +/- 0,14	0,15 +/- 0,10
Intervalo de confiança erro orientação (graus)	1,20 +/- 0,18	0,77 +/- 0,18	0,45 +/- 0,15

Fonte: O autor

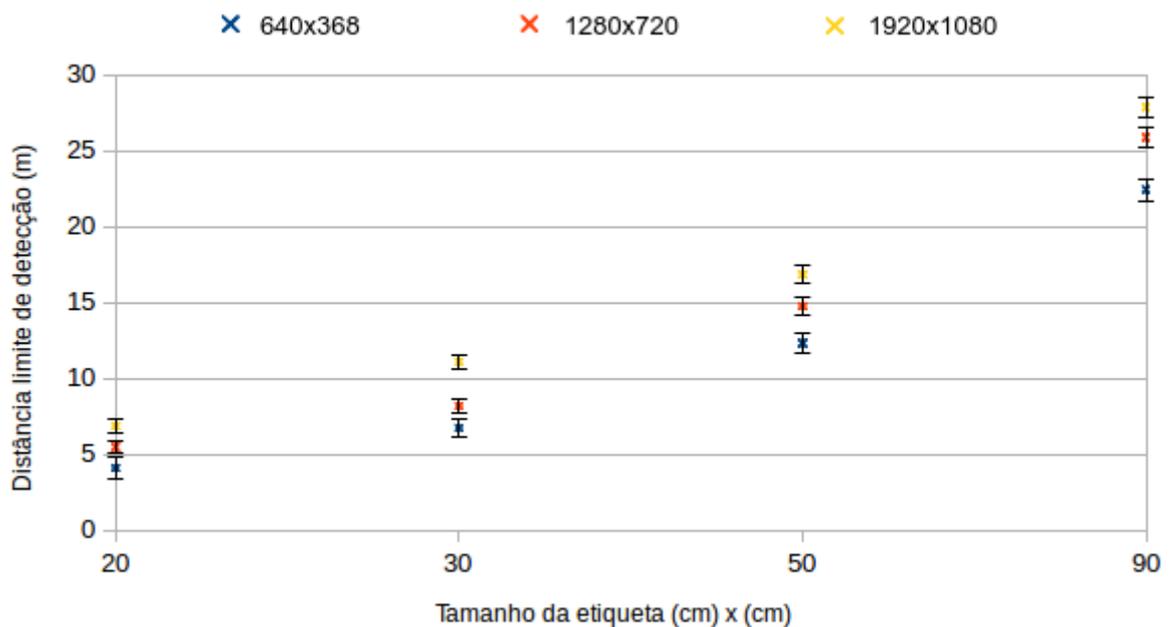
Um aumento na resolução de 640×368 pixels para 1280×720 pixels diminui o erro de posição em 35% considerando a comparação entre os intervalos de confiança. O erro de orientação também é significativamente menor para imagens de alta resolução, com uma diminuição de 27%, enquanto no caso da altura, há uma diminuição de 32% na comparação entre os intervalos.

5.3.2 Distância limite de detecção para as etiquetas

Um experimento foi proposto para avaliar a distância limite de detecção das etiquetas pela ferramenta *AR Track Alvar* dependendo do seu tamanho. Foram utilizadas quatro etiquetas quadradas de 20,0 cm, 30,0 cm, 50,0 cm e 90,0 cm de lado. As imagens foram capturadas com a câmera do Bebop Drone nas resoluções 640 x 368 pixels, 1280 x 720 pixels e 1920 x 1080 pixels. As etiquetas foram dispostas em um suporte e gradativamente afastadas da câmera até

que os dados lidos pela ferramenta apresentassem leituras do tipo *out-of-range* em um número de ocorrências maior que 20% das leituras totais aproximadamente. O resultado desse experimento são apresentados na figura 24.

Figura 24 – Distância limite de detecção da ferramenta AR Track Alvar para quatro diferentes tamanhos de etiqueta com três resoluções de imagens capturadas.



Fonte: O autor

5.3.3 Avaliação da acurácia das medidas de posicionamento horizontal em voo baseado na ferramenta AR-Tag Alvar

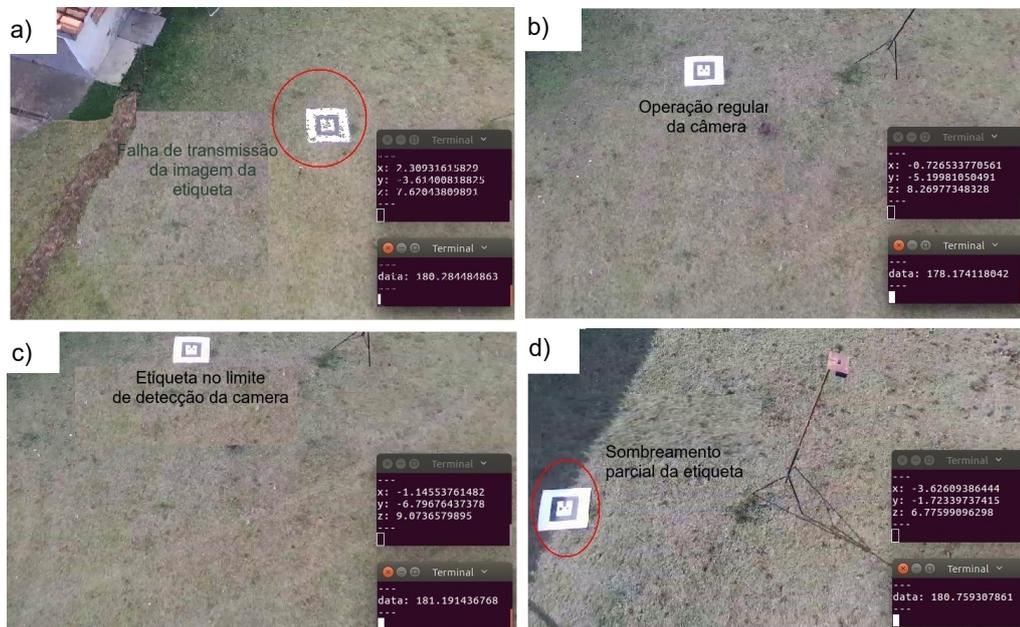
Um experimento foi executado para avaliar a acurácia das leituras de posição do VANT sob condições de voo e investigar as influências de questões como vibração e balanço da câmera, variação de luminosidade, de ângulo de visualização da etiqueta, entre outros, sobre o desempenho da ferramenta nas medidas.

As avaliações foram realizadas com o Bebop drone pilotado manualmente. O módulo *rover* do RTK-GPS foi embarcado na aeronave para servir de referência para as leituras de posição realizadas. Uma etiqueta quadrada de 50,0 cm de lado foi colocada no solo e sua posição foi medida em relação à base da antena do RTK-GPS. Foram realizados 10 voos com alturas variáveis, entre 6,0 m e 12,0 m, ao redor da etiqueta, com captura e transmissão de imagens para a estação base através do link do *Bebop Autonomy*. As imagens também foram

gravadas na memória do Bebop em uma resolução de 1280 x 720 pixels para processamento posterior. Os experimentos foram conduzidos em dias ensolarados, com incidência de luz solar direta sobre a etiqueta, entre 10h00 e 17h00, a uma velocidade máxima observada do vento de 10,0 km / h. A velocidade de voo foi limitada a 0,5 m / s. A figura 25 mostra uma série de capturas realizadas durante um dos voos.

O erro das medidas de posição dadas pelo *AR-Track Alvar* e também pela odometria do VANT, em relação às leituras do RTK-GPS, foram analisados para todos os voos. Os resultados são mostrados na tabela 9. Os cálculos excluíram as leituras de posição de distâncias maiores que o limite de detecção e aquelas com ruído de rotação da câmera. Estas variações ocorreram em um número aproximado de 23 pontos durante todos os voos realizados, e totalizaram menos que 10% do número total de amostras capturadas. A figura 25 mostra exemplos destas ocorrências específicas.

Figura 25 – Figura mostrando capturas de tela de um voo realizado, evidenciando algumas situações específicas importantes. a) Imagem transmitida com erro, causando perda da acurácia; b) Operação regular da ferramenta; c) Etiqueta próxima ao limite de detecção; d) Sombreamento parcial da etiqueta causando perda de acurácia.



Fonte: O autor

É possível verificar que, para todos os voos realizados, o erro absoluto para as leituras do AR-Tag é consideravelmente menor do que as leituras da odometria do Bebop. Analisando o

Tabela 9 – Estatísticas dos erros de posição horizontal: AR-Track Alvar × Odometria do Bebop

Voo	(1280 × 720)	(640 × 368)		Erro absoluto Bebop Média (m)	Erro absoluto Bebop Desvio Padrão
	Posição da etiqueta Erro absoluto (m)	Posição da etiqueta Desvio Padrão	Posição da etiqueta Média (m)		
1	0.24	0.21	0.50	0.30	0.80
2	0.25	0.23	0.44	0.22	0.75
3	0.19	0.33	0.47	0.27	2.42
4	0.29	0.35	0.41	0.33	0.57
5	0.22	0.32	0.52	0.31	0.43
6	0.27	0.28	0.60	0.32	1.20
7	0.20	0.37	0.45	0.36	0.93
8	0.31	0.21	0.33	0.35	2.38
9	0.32	0.25	0.31	0.29	1.47
10	0.24	0.29	0.47	0.23	2.99
Valores médios	0.25	0.28	0.45	0.30	1.19
Limite de confiança 95% (m)	0.25 ± 0.75		0.45 ± 0.81		1.09 ± 2.86

Fonte: O autor

intervalo de confiança, os valores são iguais a $0,45 \pm 0,81$ m para as medidas tomadas da etiqueta, utilizando o vídeo transmitido para a estação base. No caso do vídeo gravado em resolução de 1280x720 pixels os valores são $0,25 \pm 0,75$ m. A odometria do Bebop apresenta uma acurácia de $1,09 \pm 2,86$ m, bem menor que as obtidas pelas leituras da etiqueta. A IMU da aeronave é sensível ao histórico de dinâmica de voo, o que gera erros cumulativos. Esta é uma vantagem para a solução AR-Tag, que não depende do histórico de voos, uma vez que existe uma referência fixa no solo.

Para que os dados de posicionamento gerados pelo método atendam os requisitos de projeto definidos, descritos na figura 12, os voos do VANT devem se manter dentro da faixa de inspeção de 3,0 a 5,0 m em relação à torre, na sua posição horizontal. Analisando o intervalo de confiança mostrado na Tabela 9, o erro de posição permanece dentro de uma margem total de 2,17 m no caso das medidas tomadas com a resolução de 640 x 368 pixels e 1,25 m para a resolução maior. Esses valores garantem que o voo do VANT ficará dentro do intervalo definido nos parâmetros de segurança do voo definidos na figura 12, o que significa que a precisão obtida é adequada para a aplicação desejada. Comparado com a precisão obtida utilizando-se GPS tradicional, que oferece uma acurácia de 4,0 m, o método proposto apresenta um ganho acurácia de 45%, mostrando bom potencial para sua aplicação prática.

Alguns detalhes referentes à captura de dados durante o voo devem ser avaliados. O gráfico apresentado na figura 26 mostra uma representação das medidas de posição gravadas pelo VANT através da sua odometria, da etiqueta e do RTK-GPS, operando em modo *fix* para prover o *ground truth* para as medidas. A linha azul representa a posição medida pelo RTK, a vermelha é a medida adquirida através da etiqueta e a amarela representa a odometria do drone

Bebop. Podemos notar que a odometria do VANT inicia com um erro pequeno, aumentando gradativamente ao longo do tempo, o que é esperado para o caso de sensores inerciais presentes na IMU. Isso indica que o uso exclusivamente da odometria do VANT para posicionamento durante o voo pode causar sérios problemas para o algoritmo de navegação, o que justifica a proposição de ferramentas adicionais para esta finalidade.

No caso da leitura da etiqueta, o erro de posição aumenta com a distância absoluta entre o VANT e a mesma, o que é uma limitação do método, exigindo a utilização de etiquetas de tamanho grande suficiente para garantir a implementação adequada dos algoritmos de posicionamento propostos. Considerando que a etiqueta deve ser embarcada no VTNT, esse pode ser um problema prático considerável. O estudo de novos tipos de etiquetas para sinalização, especificamente projetadas para a aplicação de voo de VANTs em ambiente externo é um dos trabalhos futuros propostos neste projeto de pesquisa.

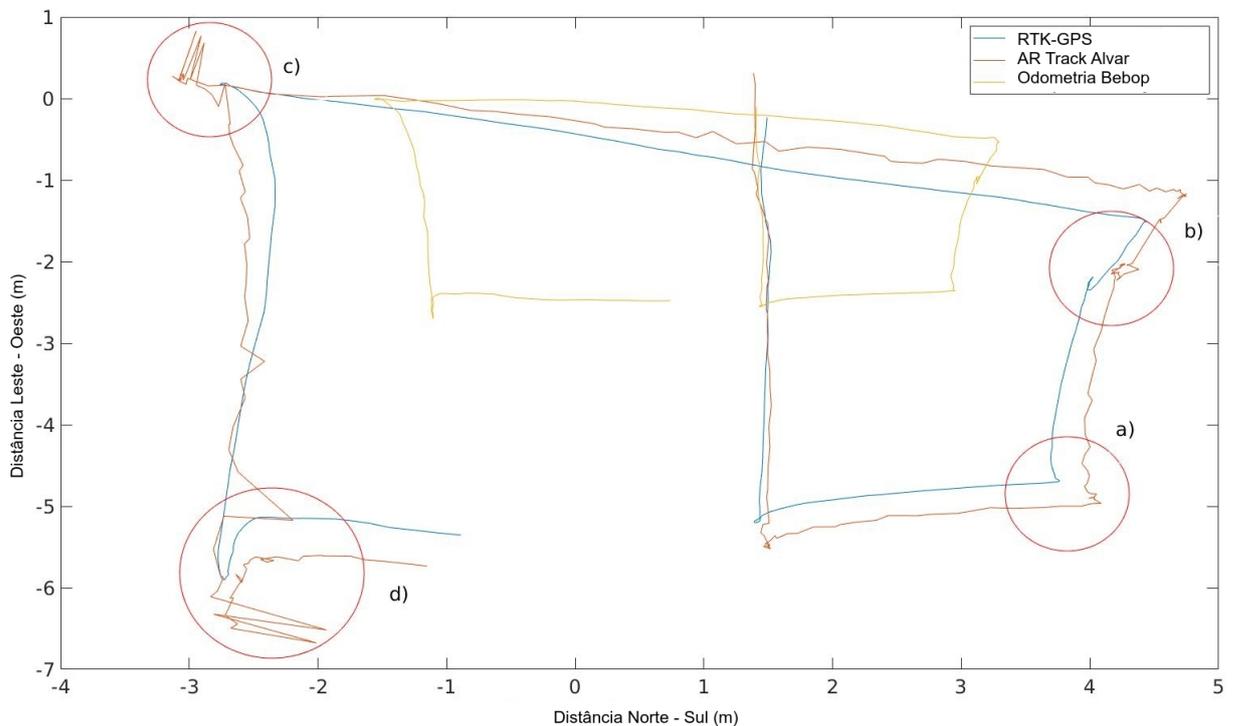
No gráfico é possível observar os pontos (a), (b) e (c) que mostram um aumento do erro nas medidas da etiqueta, circulos em vermelho. Nestes pontos o VANT realiza uma mudança de direção que gera na câmera um balanço, fazendo a posição relativa da imagem capturada mudar e conseqüentemente aumentando o erro de posicionamento. Os experimentos realizados não implementam qualquer tipo de filtragem dos sinais ou fusão de sensores, deixando a estabilização da imagem a cargo somente do *guimbal* do Bebop Drone. Apesar disso, os resultados atingidos indicam a viabilidade do método. A fusão dos dados obtidos através deste método com dados de posicionamento provenientes de outros sensores poderá aumentar significativamente a confiabilidade e estabilidade nas leituras de posição para o método proposto.

No ponto (d) ressaltado no gráfico, observa-se uma grande variação de posição ocorre nas medidas tomadas. Este ponto refere-se à uma perda de visibilidade da etiqueta pelo VANT, o que inviabiliza a manutenção da medida da mesma pelo algoritmo *AR-Track Alvar*. Este tipo de situação deve ser evitada na operação do sistema, através da garantia da posição do VANT em relação ao VTNT no solo, mantendo assim a visibilidade da etiqueta durante todo o deslocamento da aeronave. Por esse motivo a proposta do sistema cooperativo faz com que o VTNT sempre busque se posicionar na posição logo abaixo do VANT nos seus deslocamentos.

Outro ponto crítico a ser considerado é a degradação da imagem pela perda de quadros das imagens capturadas pela câmera do VANT durante a transmissão para a estação base. Uma degradação deste tipo pode ser vista na figura 25 (1). Uma forma de se minimizar esse tipo de problema é o embarque do processamento das imagens e do cálculo da posição através da etiqueta

no VANT, evitando a perda de dados e o atraso devido à transmissão para a estação base. O embarque desse processamento depende de um hardware com capacidade adequada que possa ser embarcado no VANT, o que não é possível no caso do Bebop por conta de sua baixa capacidade de carga. A construção da aeronave experimental, descrita no capítulo 3 busca possibilitar essa implementação, de forma a tornar a solução robusta para a aplicação em situações reais de processos de inspeção de torres e postes.

Figura 26 – Gráfico mostrando os dados de posicionamento adquiridos durante um voo. a), b) e c) Erros devido ao balanço da câmera na mudança de direção; d) Erro devido à perda de visibilidade da etiqueta.



Fonte: O autor

5.3.4 Análise da acurácia das medidas de posicionamento vertical em voo baseado na ferramenta AR-Tag Alvar

O posicionamento de altura da aeronave em relação ao solo é um ponto crítico para a perfeita operação autônoma do sistema de inspeção. O Bebop Drone possui um sensor ultrassônico embarcado na sua carcaça, apontado para o solo, para medir a altura de voo. Este sensor apresenta limite de distância de detecção de 8,0 m para as leituras de altura. Possui também um sensor do tipo barômetro associado à sua IMU. Considerando que os voos experimentais podem ocorrer a altura superior a 8,0 m, foi necessário embarcar o sensor LIDAR-Lite à base do

Bebop, apontando para o solo, para servir de *ground truth* para as medidas de altura. As medidas foram tomadas utilizando-se uma etiqueta quadrada de 50,0 cm de lado. Dez experimentos foram conduzidos com duas resoluções de imagem diferentes, 640×368 pixels e 1290×720 pixels. O drone Bebop foi comandado manualmente para decolar e subir em linha reta, evitando assim o balanço horizontal da aeronave, o que causaria uma inclinação do sensor LIDAR em relação ao solo, fato que poderia influenciar o resultado das medições. Os dados de altura coletados pelo sensor, pelas leituras da etiqueta e também pela odometria AR-Tag e Bebop foram registrados simultaneamente. A Figura 27 mostra as medidas de erro em relação à odometria e da leitura da etiqueta.

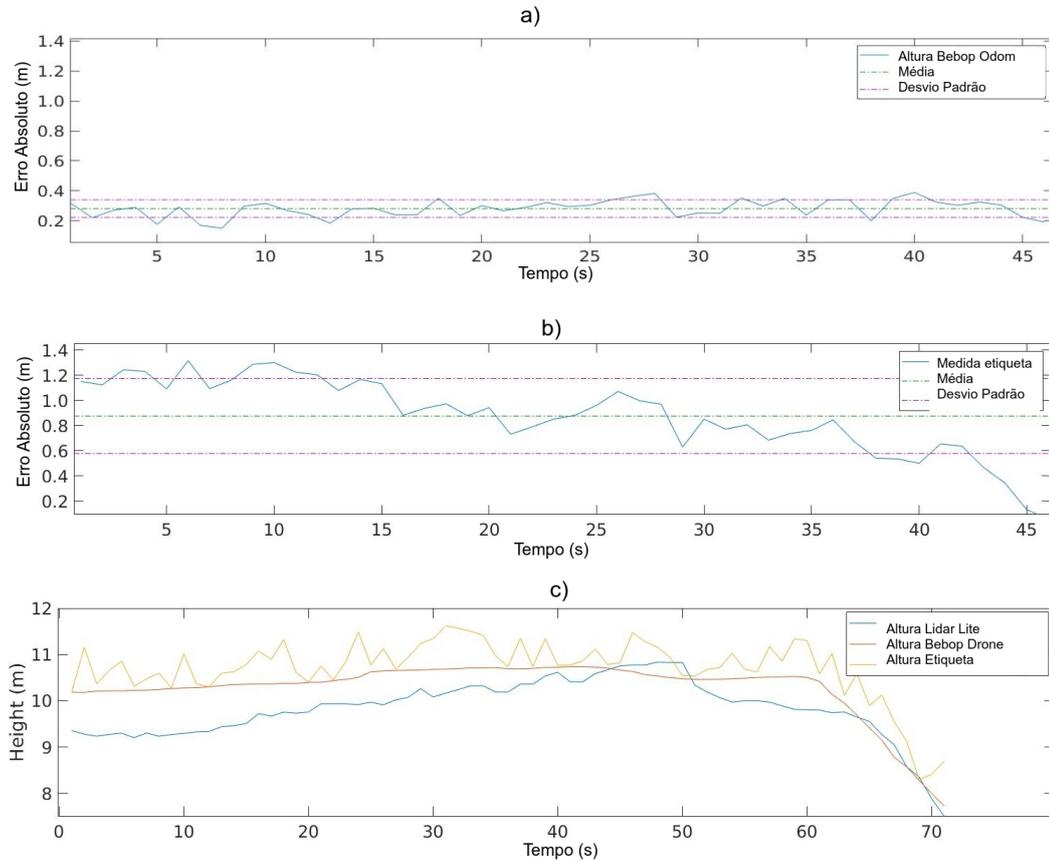
Os intervalos de segurança para o posicionamento da aeronave, definidos nos parâmetros do projeto, definem um valor de 2,0 m como aceitável para o erro de posicionamento de altura durante o voo de inspeção, conforme descritos na figura 12. A tabela 10 apresenta as médias e desvios-padrão do erro absoluto de altura para dados de odometria do Bebop e da etiqueta, calculados para todos os voos. Podemos notar mais uma vez uma diferença significativa entre o erro para a baixa resolução e para a alta resolução. O intervalo de confiança para capturas de imagens de baixa resolução é de $0,60 \pm 1,27$ m, um valor ligeiramente superior ao definido nos parâmetros de limite de operação. No caso da resolução mais alta da câmera, o intervalo diminui para $0,24 \pm 0,71$ m, valor adequado para a aplicação de inspeção proposta.

As medições da etiqueta mostram um aumento significativo no erro para voos em altitudes da ordem das realizadas nos experimentos. Esse nível de erro ocorre provavelmente porque o algoritmo *AR-Track Alvar* apresenta dificuldades para extrair e calcular o tamanho da etiqueta com precisão razoável em distâncias maiores, uma vez que este cálculo exige a extração dos contornos da etiqueta da imagem e a medição da distância de suas bordas.

5.3.5 Acurácia das medidas de orientação em voo baseado na ferramenta AR-Tag Alvar

A orientação horizontal é um parâmetro chave para manter o voo da aeronave estável. O hardware de navegação geralmente inclui um sensor de bússola com uma precisão padrão de $0,5^\circ$ para fornecer dados de orientação de voo para a aeronave. A presença de estruturas metálicas e campos magnéticos da linha de transmissão de energia pode causar interferências neste tipo de sensor, e com isso levar à perda de orientação da aeronave. A utilização da informação de orientação horizontal da etiqueta de solo é uma forma simples de oferecer informações adicionais para a orientação da aeronave durante o voo. Um experimento foi realizado para avaliar as

Figura 27 – Avaliação das medidas de altura. (a) Erro absoluto da odometria do Be-bop; (b) Erro absoluto da medida da etiqueta; (c) Comparação das medi-das entre o *ground truth*, as medidas da etiqueta e as medidas de odometria do Bebob para um voo.



Fonte: O autor

Tabela 10 – Avaliação do erro absoluto de medidas de altura para todos os voos

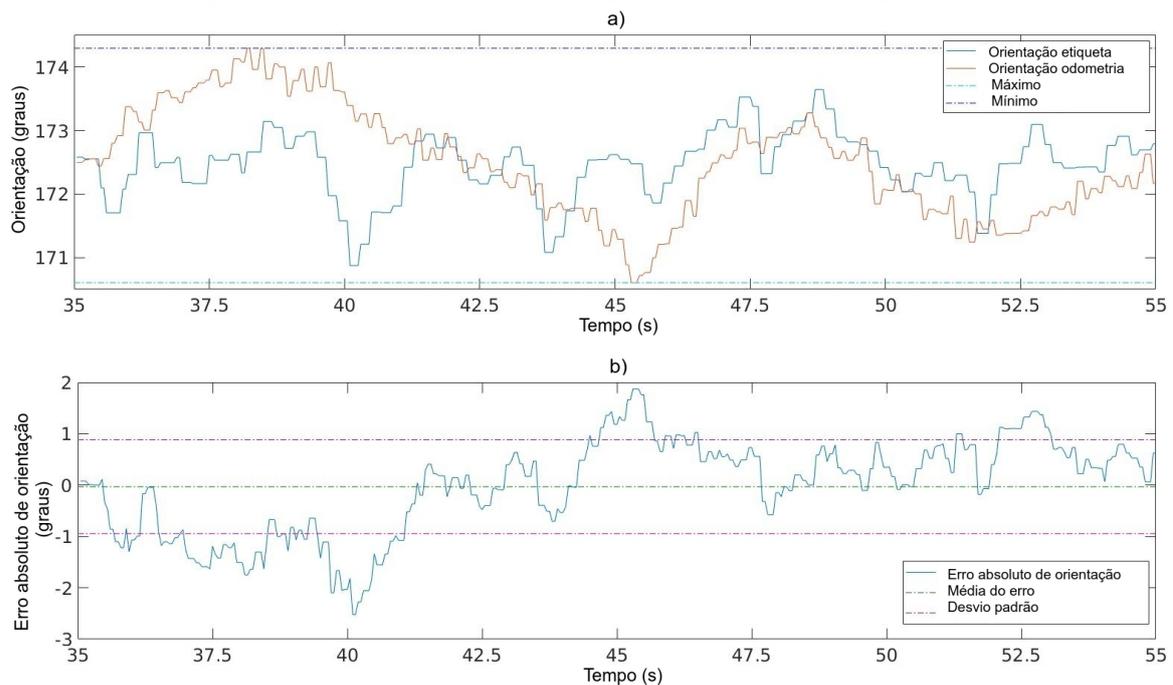
Altura	(1280 × 720) Erro de altura Etiqueta (m)	Desvio padrão medidas	(640 × 368) Erro de altura Etiqueta (m)	Desvio padrão medidas	Erro absoluto Bebop (m)	Desvio padrão medidas Bebop
3.0	0.12	0.19	0.30	0.32	0.12	0.07
4.0	0.15	0.22	0.38	0.27	0.15	0.09
5.0	0.16	0.24	0.42	0.35	0.22	0.10
6.0	0.19	0.25	0.51	0.44	0.19	0.14
7.0	0.22	0.23	0.52	0.47	0.25	0.13
8.0	0.26	0.26	0.65	0.51	0.37	0.15
9.0	0.29	0.30	0.74	0.56	0.43	0.18
10.0	0.33	0.31	0.80	0.55	0.48	0.19
11.0	0.36	0.27	0.83	0.59	0.57	0.22
12.0	0.37	0.39	0.87	0.63	0.59	0.23
Valores médios	0.24	0.27	0.60	0.47	0.33	0.15
Intervalo de confiança 95% (m)	0.24 ± 0.71		0.60 ± 1.27		0.33 ± 0.40	

Fonte: O autor

influências das condições dinâmicas de voo nas leituras de orientação horizontal. A orientação obtida pela leitura da etiqueta durante o voo foi comparada com a orientação lida da bússola

interna do Bebop, que serviu de *ground truth* no experimento. Foi utilizada para as medidas uma etiqueta de 0,5 m de lado, com 10 voos realizados em diferentes alturas dentro do intervalo de 6,0 m e 12,0 m, em trechos de linha reta acima da etiqueta para garantir uma melhor comparação com as medidas obtidas através do sensor do VANT. As imagens foram coletadas em duas resoluções diferentes, 640×368 pixels e 1280×720 pixels. Para minimizar a influência do voo dinâmico nas medições dos dados de orientação da odometria do Bebop, os valores relativos ao início e ao final dos deslocamentos foram descartados para garantir um tempo de estabilização adequado para a IMU. A figura 28 (a) mostra as leituras de orientação da etiqueta *versus* a orientação lida do Bebop, para um intervalo de voo de 55.0 s. A Figura 28 (b) mostra o erro de orientação absoluto para o mesmo intervalo.

Figura 28 – Avaliação do erro de orientação para um voo. (a) Diferença entre medidas tomadas com a etiqueta e as medidas da odometria do Bebop. (b) Erro absoluto das medidas tomadas com a etiqueta em relação à odometria do Bebop.



Fonte: O autor

Como pode ser observado no gráfico apresentado na figura 28, as leituras de medição de orientação da etiqueta apresentaram valores próximos às da odometria do Bebop. Esses resultados demonstram a viabilidade de usar a etiqueta para fornecer dados de orientação para o voo do VANT. Valores da estatística dos dez voos realizados são apresentados na tabela 11. Os valores do intervalo de confiança indicam que o erro absoluto permanece dentro de $0,93 \pm 1,32^\circ$ para as leituras da etiqueta realizadas com a resolução de 640×368 pixels e $0,55 \pm 0,73^\circ$ para

a resolução de 1280x720 pixels. Considerando que o ângulo de orientação é utilizado como referência auxiliar, na busca de aumentar a robustez dos dados quando o sensor tradicional sofre interferência pelos campos magnéticos da linha de transmissão, os resultados obtidos foram considerados adequados para a implementação do método proposto.

Tabela 11 – Estatísticas das medidas de orientação obtidas da etiqueta para 10 voos

Voo	(1280 × 720)		(640 × 368)	
	Erro absoluto de orientação	Desvio Padrão	Erro absoluto de orientação	Desvio Padrão
1	0.67	0.23	1.10	0.52
2	0.55	0.30	1.04	0.58
3	0.73	0.31	0.79	0.43
4	0.56	0.25	0.86	0.45
5	0.59	0.27	0.88	0.52
6	0.47	0.20	0.93	0.49
7	0.51	0.33	0.78	0.58
8	0.57	0.25	1.02	0.37
9	0.43	0.24	0.99	0.45
10	0.39	0.28	0.93	0.56
Média	0.55	0.27	0.93	0.49
95% Intervalo de confiança (graus)		0.55 ± 0.73	0.93 ± 1.32	

Fonte: O autor

5.4 AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CONTROLE DO VEÍCULO TERRESTRE BASEADO NA REALIMENTAÇÃO VISUAL DADA PELO VANT

Esta seção descreve o experimento de controle de deslocamento VTNT utilizando-se a referência de posição fornecida pelo VANT. O objetivo foi a investigação da capacidade do veículo terrestre em alcançar precisamente o ponto imediatamente abaixo do VANT utilizando dados os dados de posição fornecidos pela leitura da etiqueta colocada sobre ele. Como descrito na seção 4, o veículo terrestre deve ser capaz de se movimentar utilizando como referência as leituras de posição relativa entre ele e a aeronave, baseadas nos cálculos realizados através do uso da etiqueta colocada em seu topo.

O primeiro experimento avaliou o controle do VTNT usando os dados de posição tomados em uma condição controlada. O experimento foi realizado em um local fechado, com o Bebop preso em um suporte fixo a uma altura de 3,0 m. Uma etiqueta de 20,0 cm foi colada no topo do VTNT de forma a ficar visível para a câmera do VANT durante todo o tempo do deslocamento. O veículo partiu de vários pontos diferentes, todos a uma distância aproximada de 2,0 m da posição horizontal do VANT, e iniciou os movimentos com orientações diversas em relação ao ponto de destino. A figura 29 mostra uma imagem do arranjo experimental montado.

Figura 29 – Arranjo experimental montado para teste do algoritmo de controle em ambiente interno com o VANT fixo.



Fonte: O autor

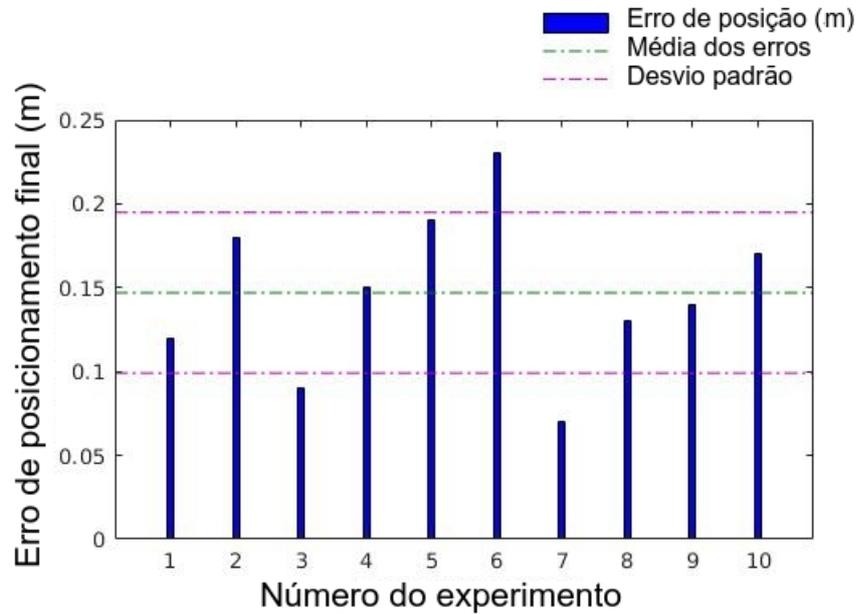
O algoritmo de controle foi programado para deslocar o VTNT até este alcançar o ponto final desejado abaixo do VANT com um intervalo de tolerância de 10,0 cm, definido de forma a representar um valor igual à 5% do deslocamento total do veículo durante o experimento.

Para cada rodada, o erro de posição final foi medido manualmente. O erro total de cada rodada é apresentado na figura 30. O veículo alcançou o ponto final em todas as rodadas com sucesso. O erro de posição apresentado pelo posicionamento cooperativo foi inferior a 25,0 cm, em todas as rodadas.

Um segundo experimento foi realizado para investigar a influência das condições de voo ao ar livre no controle autônomo do VTNT. Fatores como vibração e balanço da câmera do VANT, perda de quadros das imagens transmitidas e variação de luz sobre a etiqueta podem afetar a eficácia das leituras e o funcionamento do algoritmo de controle. A figura 31 mostra uma imagem do arranjo experimental montado no ambiente externo.

Dez rodadas de experimentos foram realizadas com diferentes pontos de partida, à uma distância aproximada de 5,0 m do ponto de chegada, com orientações iniciais variadas. A figura 32 mostra uma sequência temporal de imagens capturadas durante um deslocamento do VTNT

Figura 30 – Gráfico do erro de posição final do deslocamento do VTNT em ambiente controlado.



Fonte: O autor

Figura 31 – Visão geral da montagem do arranjo da experimentação externa do VTNT e seus componentes.

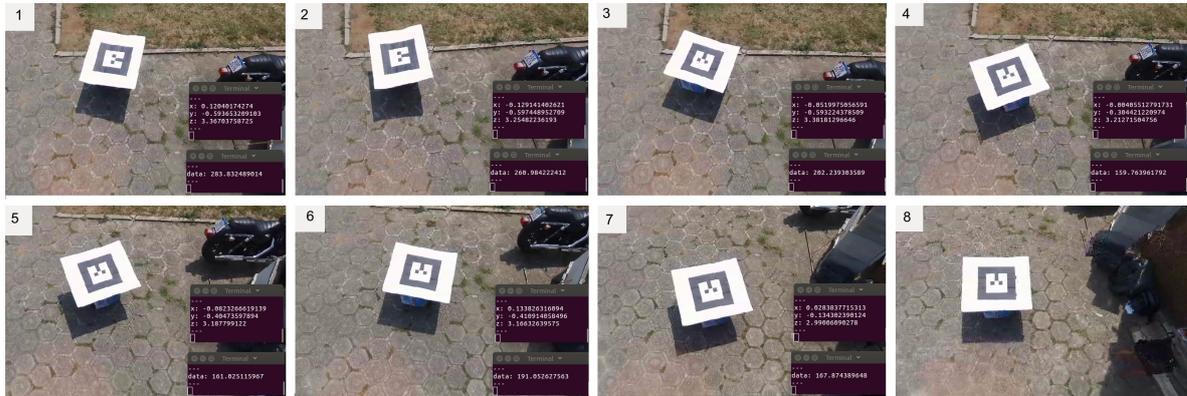


Fonte: O autor

do ponto de vista do VANT durante um dos experimentos.

O VANT foi comandado para decolar e permanecer em uma posição relativamente estática acima da área de deslocamento do VTNT. O veículo terrestre foi comandado para se deslocar e parar a uma tolerância final de 22,0 cm do ponto desejado. A tolerância foi definida

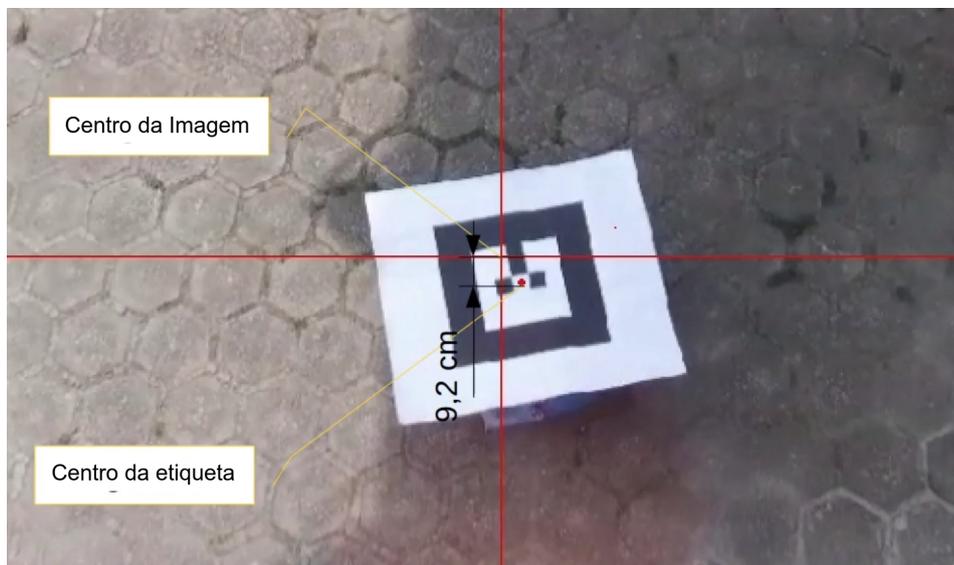
Figura 32 – Captura de telas das imagens de deslocamento do VANT em experimento externo. 1) Início do deslocamento; 2) a 7) VTNT seguindo o VANT; 8) Final de deslocamento do VTNT abaixo do VANT.



Fonte: O autor

de forma a representar um valor menor que 5% do deslocamento total do veículo durante o experimento. Ao final de cada deslocamento o erro total de posição foi medido através da análise visual, utilizando-se da imagem capturada quando o VTNT parou seu movimento. A figura 33 apresenta uma representação gráfica mostrando como o erro foi calculado.

Figura 33 – Erro absoluto de posição para os deslocamentos do VTNT no experimento externo.



Fonte: O autor

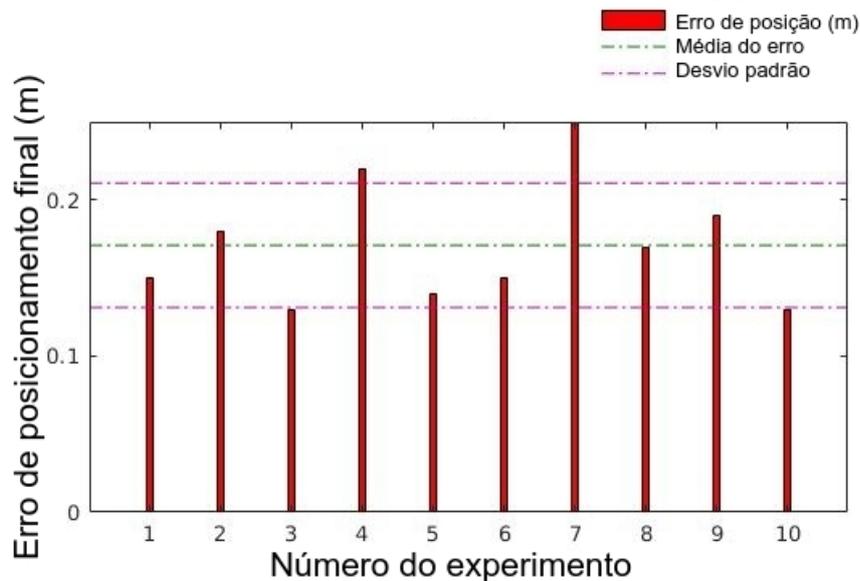
A figura 34 apresenta a representação gráfica do erro de posição absoluta para todas as rodadas. O erro foi calculado medindo-se visualmente a distância absoluta do ponto central do topo do VTNT em comparação com o ponto final definido, analisado na imagem capturada no final do deslocamento. Para todas as rodadas o erro final foi inferior a 25,0 cm, com desvio padrão igual a 20,0 cm para o grupo de medidas. Esta dimensão do erro é pequena se comparada

ao tamanho do veículo e à distância total do caminho executado, permitindo concluir que a posição de controle é aceitável para o método proposto.

Um ponto forte do método é o fato do veículo ter sido capaz de se orientar e se descolar de forma adequada em todos os experimentos, mesmo com a ocorrência de falhas de transmissão de imagens, como visto na figura 32 (1). Essas perdas geram erros no algoritmo de cálculo de posição da etiqueta, gerando dados incorretos de posição para o sistema de controle. Apesar disso, o veículo foi capaz de recuperar corretamente seu deslocamento em todas as situações, mostrando um bom desempenho para o método proposto.

O giro do VANT no eixo vertical, que causa o deslocamento da imagem da etiqueta sobre o VANT, não afetou significativamente o algoritmo de controle do veículo. A vibração da câmera durante o voo, outro fator relevante, não causou em nenhum dos experimentos a perda severa de controle do deslocamento do veículo, impedindo o mesmo de atingir seu objetivo final.

Figura 34 – Erro absoluto de posição para os deslocamentos do VTNT no experimento externo.



Fonte: O autor

5.5 DISCUSSÃO

Os experimentos realizados nesta sessão tem como objetivo investigar e validar as técnicas utilizadas para a composição do método de posicionamento cooperativo proposto. A técnica de posicionamento de voo através da leitura de etiquetas de solo se mostrou adequada com base nos resultados obtidos.

No caso do sistema de navegação por realimentação visual o resultado também se mostrou promissor, tendo em vista as limitações técnicas dos veículos utilizados para a experimentação (baixo payload do Bebop Drone, limitações de deslocamento do Pioneer em terrenos acidentados). Espera-se que a utilização de uma aeronave e um veículo terrestre de melhor porte permitam a melhoria desses resultados.

Ressalta-se que não foi possível identificar na literatura, até o presente momento, trabalhos que apresentam métodos similares nas condições utilizadas neste estudo. No próximo capítulo faremos uma discussão detalhada sobre estas questões.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho de pesquisa buscou investigar fatores como a viabilidade técnica, as condições de funcionamento e aplicação, e o modelo adequado para o desenvolvimento de um método cooperativo de posicionamento entre um VTNT e um VANT para aplicação na inspeção detalhada de torres e postes de distribuição de energia. As revisões técnica e bibliográfica realizadas demonstraram que esta área de estudo não apresenta métodos ou soluções similares à descrita nesta pesquisa, o que motivou o desenvolvimento da mesma.

Outro fator motivador foi a grande demanda de soluções para a área de inspeção detalhada de torres e postes de distribuição, em especial soluções que possam contribuir com o aumento da produtividade e fazer frente aos problemas técnicos relativos ao processo em questão. Dentre estas necessidades, foi identificado que o desenvolvimento de sistemas automáticos de inspeção, baseados em veículos autônomos para coleta de dados, é de extremo interesse para as empresas do setor elétrico. A utilização de veículos autônomos pode simplificar as tarefas relativas ao processo de inspeção, bem como trazer mais segurança e eficácia para a realização das mesmas, diminuindo os riscos aos quais os operadores, as estruturas e os equipamentos são expostos.

Através dos experimentos realizados foi possível identificar as especificidades de cada um dos elementos que compõem o método proposto, permitindo a implementação de técnicas inovadoras para a resolução do problema de posicionamento cooperativo. Para cumprir o objetivo geral do trabalho, uma série de objetivos específicos foram propostos e avaliados, de forma estruturada, ao longo do desenvolvimento da pesquisa.

O primeiro objetivo específico proposto foi o estudo dos parâmetros técnicos adequados para a operação de um sistema de inspeção detalhado de torres e postes de distribuição de energia baseado em veículos aéreos autônomos. Este é um aspecto fundamental para a realização da pesquisa, pois é através deste estudo e da definição desse conjunto de parâmetros de operação que se torna possível a proposição de soluções para a aplicação real desejada.

Identificou-se nos estudos realizados que não foi apresentada, até o momento, uma sistematização e definição clara sobre como o processo de inspeção de torres e postes através de VANTs deve ser realizado, seja através de sistemas autônomos ou através de sistemas pilotados manualmente. Realizou-se então o estudo deste problema, com base nas entrevistas com engenheiros e técnicos da empresa local de distribuição de energia, onde foi possível

identificar de forma clara os desafios enfrentados nos trabalhos de inspeção com VANTs, e também quais parâmetros de voo a aeronave deve respeitar para a realização segura da inspeção das estruturas. Os resultados foram descritos na forma de um conjunto de parâmetros que serviram de base para a proposição e desenvolvimento das ferramentas propostas neste trabalho, conforme apresentados na seção 4.0.1.

Definida a questão do posicionamento cooperativo como o ponto chave do trabalho de pesquisa, realizou-se o estudo e proposição de ferramentas aplicáveis à composição do método. Primeiramente avaliou-se o desempenho do sensor LIDAR Lite para uso como referência para a realização das medidas de alturas baseadas na etiqueta de solo. Os experimentos com este sensor demonstraram um bom desempenho para aplicação nas condições desejadas. O sensor apresentou um erro menor que 10,0 cm para distâncias menores que 40,0 m, no caso do alvo colocado em local sem incidência direta de luz solar. Com o alvo colocado em local com incidência direta de luz solar, o erro foi menor que 10,0 cm para distâncias menores que 15,0 metros, valor considerado adequado para a realização dos experimentos necessários à avaliação do método proposto.

Os módulos RTK-GPS da Emild forneceram a referência de posição para os experimentos de medição de erro do método de posicionamento horizontal baseado na etiqueta de solo, com a aeronave em voo. Os módulos utilizados apresentaram algumas limitações de desempenho relativas às condições ambientais e à forma de instalação das antenas receptoras da estação base e do módulo embarcado na aeronave. Foi observada uma influência significativa da presença de obstáculos que geram sombreamento das antenas e diminuem a qualidade de recepção dos sinais de satélite pelos módulos, causando a perda da acurácia das medidas. Esses problemas foram sanados através da instalação e utilização dos módulos em locais específicos, com condições ambientais propícias para que pudessem operar na sua máxima acurácia e servir de referência para as medidas necessárias.

O estudo realizado durante a revisão bibliográfica indicou um número pequeno de propostas relacionadas às soluções de posicionamento de precisão para VANTS na inspeção de torres, duas delas baseadas na criação de uma odometria visual utilizando-se de imagens da estrutura e uma delas utilizando-se de um sensor LIDAR planar para cálculo da distância relativa entre o VANT e a torre. De forma mais geral, as técnicas de posicionamento visual para voo externo se baseiam na utilização de "*natural landmarks*", ou seja, de aplicação de técnicas de identificação automática de objetos presentes no ambiente para cálculo do deslocamento relativo

em relação aos mesmos durante o voo. Esta é uma técnica promissora para implementação de sistemas de controle de posição de VANTs autônomos, mas exige grande quantidade de recurso computacional para o processamento das informações e se apresenta sensível à variações ambientais. Dessa forma, foi proposta a utilização de uma ferramenta que utiliza um "*artificial landmark*", ou seja, um objeto visual especificamente projetado para servir de referência no solo, permitindo um funcionamento otimizado para o sistema de processamento e identificação visual.

A escolha para a implementação e teste desta técnica foi a utilização de uma etiqueta impressa com uma figura específica, baseada na ferramenta *AR-Track Alvar*. Esta ferramenta foi inicialmente proposta para o desenvolvimento de aplicações de realidade aumentada, em ambiente controlado de iluminação e estrutura. Foram propostos experimentos para avaliar a viabilidade da sua aplicação para as condições necessárias ao arranjo experimental, com o VANT voando à grande distância e com condições de iluminação e de movimentação da câmera diferentes das quais a ferramenta foi projetada inicialmente para trabalhar.

Os resultados demonstraram que a ferramenta é capaz de gerar dados de posicionamento horizontal adequados à aplicação proposta. Considerando-se os experimentos realizados com as imagens em resolução de 640x368 pixels, padrão para o *Bebop Autonomy*, os valores dos erros obtidos permaneceram menores que 5% da distância total medida em todos os experimentos. Os erros foram significativamente reduzidos com o aumento das resoluções da câmera, em um percentual médio de 30% para a resolução de 1280 x 720 pixels e de 60% para a resolução de 1920 x 1080 pixels. Esses valores foram considerados adequados para a medida de posicionamento nas condições avaliadas, demonstrando a viabilidade do uso desta ferramenta para a implementação prática e avaliação do método proposto.

Procedeu-se em seguida a investigação do desempenho desta ferramenta em situação de voo externo, onde as condições de vibração e balanço da aeronave e da câmera poderiam influenciar nas medidas. Para isso o sistema de posicionamento de RTK-GPS embarcado na aeronave foi utilizado como referência para as medidas de posição realizadas com a etiqueta fixa no solo. Os resultados demonstraram que a solução foi capaz de gerar dados de posicionamento horizontal com um erro médio dentro do intervalo de $0,45 \pm 0,81$ metros, considerando o cálculo do intervalo de confiança de 5%, com a captura das imagens em resolução de 640x368 pixels. Para a avaliação realizada com resolução de 1280x720 pixels houve uma redução desse erro, permanecendo o intervalo entre $0,25 \pm 0,75m$.

Quando comparados esses erros com os erros presentes em posicionamento como o

GPS regular, que é de 4,0 m de acordo com o padrão internacional para este tipo de equipamento, o método proposto apresentou para o seu melhor resultado um ganho de acurácia 3,8 vezes superior.

Uma das limitações encontradas nos experimentos foi a necessidade de utilização de uma etiqueta grande o suficiente para garantir a visibilidade e a capacidade de detecção do algoritmo de processamento de posição, pelo fato da aeronave voar a distâncias e altitudes elevadas. Outro ponto observado nesta experimentação foi a variabilidade de acurácia das medidas devido à variação das condições de iluminação observadas no ambiente externo. Esses problemas indicam que a utilização de uma etiqueta visual impressa não oferece o máximo de potencial de resposta para este tipo de aplicação, o que motiva a investigação e proposição de novas ferramentas para esse fim, como por exemplo a utilização de etiquetas com iluminação ativa, de sinalizadores baseados em LEDs ou outras ferramentas do tipo. Vale ressaltar que a escolha da ferramenta *AR-Track Alvar* para a implementação do método proposto neste estudo se baseou na facilidade de implementação devido ao fato da ferramenta já proporcionar os algoritmos de processamento e cálculo de posição e orientação prontos, com interface facilitada através do ROS. Isso permitiu a construção de uma base experimental rápida para validar a ideia geral do método, possibilitando investigar as questões envolvidas no problema e propor soluções em um tempo reduzido.

Tais resultados permitiram que a pesquisa avançasse para a fase de concepção e implementação do método de posicionamento cooperativo entre o VANT e o VTNT. Para verificar a viabilidade de utilização do sistema cooperativo de posicionamento, foram propostos experimentos buscando avaliar a capacidade do VANT fornecer dados de posição relativa para o controle de navegação autônoma do VTNT. O método proposto tem como objetivo possibilitar a movimentação do veículo de solo de forma correta e precisa, com base na informação de posição gerada pelo VANT através do processamento da etiqueta colocada no topo do VTNT. Neste caso, o VANT calcula a sua posição relativa ao veículo terrestre e realimenta o sistema de posicionamento do mesmo para navegar até um ponto específico relativo à aeronave.

Os experimentos foram realizados com um veículo do tipo Pioneer 3, sendo seu controle autônomo programado e realizado utilizando-se um algoritmo PID. Os resultados apresentados mostraram boa capacidade do veículo terrestre se localizar e navegar com base nas informações fornecidas pelo VANT através do sistema de posicionamento proposto, mesmo em condições onde o voo da aeronave gerava movimentação na câmera e giro de posicionamento

da mesma em relação à referência do veículo terrestre. O erro final de posicionamento para todos os deslocamentos realizados foi inferior a 0,25 m, adequado para a aplicação proposta. Situações de perda de imagens transmitidas do VANT para a estação base, onde os algoritmos de processamento estavam sendo executados, não influenciaram significativamente no controle e navegação do veículo terrestre, indicando que a técnica é promissora para a construção de sistemas de navegação cooperativa.

Ressalta-se que o método proposto nesta pesquisa, baseado no posicionamento através do processamento visual das etiquetas de solo, é apenas um dentre vários que podem compor a solução final de uma possível arquitetura de inspeção a ser implementada para uso nas tarefas de inspeção. A fusão de sensores e a concepção de algoritmos inteligentes é uma forma possível de buscar a melhoria destes resultados.

Concluindo, podemos afirmar que os resultados atingidos estão dentro dos especificados na proposta inicialmente. Os resultados do método de posicionamento do VANT através da leitura de etiquetas de solo se mostraram adequados para aplicação em ambiente real, dentro das restrições impostas. Da mesma forma, o método de navegação do VTNT baseado em realimentação visual também apresentou resultados dentro das especificações determinadas, demonstrando a viabilidade de aplicação desta técnica em ambientes reais, consideradas as questões de escala e os parâmetros ambientais e técnicos necessários.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

O trabalho apresentado neste documento compõe uma parte específica de um trabalho de extenso, com foco na criação de um método de inspeção cooperativa de estruturas de transmissão de energia elétrica. Como visto ao longo do documento, a ênfase dada à pesquisa aqui apresentada foi a proposição e validação dos métodos de posicionamento cooperativo entre os veículos. Esta é apenas uma parte do conjunto de soluções necessárias para a implementação completa de um sistema de inspeção autônoma deste tipo, sendo importante a continuidade da pesquisa e desenvolvimento desta linha para a complementação da solução final.

Entre os trabalhos futuros previstos nesta pesquisa, estão os relacionados aos algoritmos de controle necessários à operação autônoma, a melhoria da arquitetura de detecção e identificação de obstáculos, o desenvolvimento de uma solução de comunicação robusta para garantia da troca eficaz de dados entre a estação base e os veículos, a proposição de algoritmos inteligentes de detecção e identificação de defeitos nos componentes, entre outras frentes que ficaram evi-

denciadas na pesquisa. Considerando a extensão do tema, definimos um foco prioritário para as próximas investigações de interesse para a solução aqui proposta.

A primeira proposta de trabalho é a avaliação de um sistema de posicionamento relativo entre os veículos e a torre baseado na composição de dados entre um sistema de imagens regulares e os dados de medição de distância coletados de um LIDAR planar. A ideia é utilizar sistemas de visão computacional e aplicação de algoritmos de inteligência artificial para identificar a presença e a posição de uma torre dentro de um quadrante da imagem, oferecendo uma referência para direcionar a leitura do sensor LIDAR na avaliação da distância da aeronave até a face da torre. Esse sistema pode oferecer dados adicionais relevantes para a manutenção do posicionamento adequado da aeronave em relação à torre durante o voo de inspeção, garantindo um nível adicional de segurança para o sistema.

Uma segunda proposta de trabalho é a melhoria no sistema de detecção de obstáculos da aeronave experimental, baseado em sensores de melhor desempenho que os avaliados até o momento. Estes sensores estão sendo adquiridos de forma contínua, dependendo da disponibilidade de recursos financeiros pelo laboratório de pesquisa. Suas aquisições permitirão a experimentação de novas arquiteturas adequadas ao sistema autônomo de controle para ambos os veículos. Apesar de não ser um objetivo específico da pesquisa aqui apresentada, esse é um ponto essencial do desenvolvimento da solução final do sistema de inspeção.

O sistema proposto até o momento partiu do pressuposto da aplicação em inspeção detalhada de torres individuais. Todos os parâmetros do projeto foram definidos com base neste tipo de problema. A expansão do sistema para a inspeção colaborativa de um conjunto de torres ao longo de uma linha de transmissão, e também da inspeção das linhas de transmissão entre um conjunto de torres consecutivas, é uma das propostas de trabalho futuro de interesse do grupo. Essa expansão será primeiramente focada nos algoritmos de controle autônomo de navegação dos veículos, com a construção das soluções necessárias para resolver os problemas práticos relacionados ao processo, como identificação e desvio de obstáculos, geração automática de rotas, pouso e decolagem autônoma do VANT no topo do VTNT, entre outras. A ideia para uma primeira versão desta pesquisa é a criação de um ambiente virtual que simule os parâmetros encontrados nos experimentos realizados até o momento, dentro de um ambiente de simulação como o V-REP por exemplo, de forma a permitir a avaliação dos algoritmos desenvolvidos em alto nível, para posteriormente serem realizados os experimentos de validação em ambiente real.

REFERÊNCIAS

AL-KAFF, Abdulla. Survey of computer vision algorithms and applications for unmanned aerial vehicles. **Expert Systems with Applications: An International Journal**, v. 92, p. 1–3, 2018.

ALHASSAN, Ahmad Bala; ZHANG, Xiaodong; SHEN, Haiming; XU, Haibo. Power transmission line inspection robots: A review, trends and challenges for future research. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 118, p. 105862, 2020. ISSN 0142-0615. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061519324524>.

ANEEL. **Resolução normativa nº 669**. ANEEL, 2015. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2014/022/resultado/ren2015669.pdf>. Acesso em: 30/09/2020.

ANEEL. **Prospecção tecnológica no setor de energia elétrica**. CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS- CGEE., 2017. Disponível em: https://www.cgee.org.br/documents/10195/734063/aneel_2017_1-8.pdf/4363cc8a-d56b-4004-925d-fe72180f2257?version=1.5.

AQEL, Mohammad O.A.; MARHABAN, Mohammad H.; SARIPAN, M. Iqbal; ISMAIL, Napsiah Bt. Review of visual odometry: types, approaches, challenges, and applications. **SpringerPlus**, Springer International Publishing, v. 5, n. 1, 2016. ISSN 21931801.

ARAAR, Oualid; AOUF, Nabil. Visual servoing of a Quadrotor UAV for autonomous power lines inspection. **22nd Mediterranean Conference on Control and Automation**, IEEE, p. 1418–1424, jun 2014. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6961575>.

ARAAR, Oualid; AOUF, Nabil; DIETZ, Jose Luis Vallejo. Power pylon detection and monocular depth estimation from inspection UAVs. **Industrial Robot**, v. 42, n. 3, p. 200–213, 2015. ISSN 0143991X.

ARAAR, Oualid; AOUF, Nabil; VITANOV, Ivan. Vision Based Autonomous Landing of Multirotor UAV on Moving Platform. **Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications**, v. 85, n. 2, p. 369–384, 2017. ISSN 15730409.

ARDUPILOT. **Introducing copter**. 2019. Disponível em: <http://ardupilot.org/>. Acesso em: 30/05/2019.

BERGER, Guido; WEHRMEISTER, Marco. Método para projetar arquiteturas de sensores para detecção de obstáculos em veículos aéreos não tripulados dedicados a inspeção de torres de alta

tensão. **Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial - CPGEI**, UTFPR, 2019.

BERGER, G. S.; WEHRMEISTER, M. A.; FERRAZ, M.; OLIVEIRA, A. S.; CANTIERI, A. R. Analysis of low cost sensors applied to the detection of obstacles in high voltage towers. *In: International Embedded Systems Symposium (IESS'19)*. [S.l.: s.n.], 2019. v. 1, p. 1–12.

BIAN, Jiang; HUI, Xiaolong; ZHAO, Xiaoguang; TAN, Min. A Novel Monocular-Based Navigation Approach for UAV Autonomous Transmission-Line Inspection. **IEEE International Conference on Intelligent Robots and Systems**, p. 6207–6213, 2018. ISSN 21530866.

BIAN, Jiang; HUI, Xiaolong; ZHAO, Xiaoguang; TAN, Min. A monocular vision-based perception approach for unmanned aerial vehicle close proximity transmission tower inspection. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 16, n. 1, p. 1–20, 2019. ISSN 17298814.

CANTELLI, Luciano; GUASTELLA, Dario; MELITA, Carmelo; MUSCATO, Giovanni. Ugv navigation in unstructured environments through uav survey. *In: Human-Centric Robotics*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 327–334.

CANTELLI, L.; LAUDANI, P.; MELITA, C. D.; MUSCATO, G. UAV/UGV cooperation to improve navigation capabilities of a mobile robot in unstructured environments. **Advances in Cooperative Robotics: Proceedings of the 19th International Conference on Climbing and Walking Robots and the Support Technologies for Mobile Machines**, p. 217–224, 2016.

CANTIERI, Alvaro; BERGER, Guido; FERRAZ, Matheus; WEHRMEISTER, Marco; OLIVEIRA, André; ARIMATÉIA, Carlos; LEJAMBRE, Albari. Proposta e avaliação de uma arquitetura de inspeção autônoma de torres de distribuição de energia elétrica baseada em vant autônomo multi-sensoriado. *In: Anais do 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI*. [S.l.: s.n.], 2019.

CANTIERI, Alvaro; FERRAZ, Matheus; BERGER, Guido; TEIXEIRA, Marco Antônio; LIMA, José; OLIVEIRA, André; WEHRMEISTER, Marco. Cooperative uav-ugv autonomous power pylon inspection: An investigation of cooperative outdoor vehicle positioning architecture. **Sensors**, MDPI AG, v. 20, n. 21, p. 6384, Nov 2020.

CANTIERI, Alvaro; OLIVEIRA, André de; WEHRMEISTER, Marco; FABRO, João; VAZ, Marlon. Environment for the dynamic simulation of ros-based uavs. *In: ____*. **Robot Operating System - ROS: The Complete Reference - Volume 2**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017. p. 565–596. ISBN 978-3-319-54927-9.

CANTIERI, Alvaro; ROHRICH, Ronnier; OLIVEIRA, André; FABRO, João; WEHRMEISTER, Marco. Collaborative quadricopter-mobile robots ground scan using artags visual pose

estimation. *In: 2017 Latin American Robotics Symposium (LARS) and 2017 Brazilian Symposium on Robotics (SBR)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 1–6.

CANTIERI, Alvaro; WEHRMEISTER, Marco; OLIVEIRA, André; LIMA, José; FERRAZ, Matheus; BERGER, Guido. Proposal of an augmented reality tag uav positioning system for power line tower inspection. *In: Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 87–98. ISBN 978-3-030-35990-4.

CANTIERI, Alvaro Rogério; ROHRICH, Ronnier.; OLIVEIRA, André; WEHRMEISTER, Marco; FABRO, João; OLIVEIRA, Marlon; GOULART, Magnus; HIDEKI, Guilherme. A quadcopter and mobile robot cooperative task using visual tags based on augmented reality ros package. *In: _____. Robot Operating System (ROS): The Complete Reference (Volume 3)*. Cham: Springer International Publishing, 2019. p. 185–208. ISBN 978-3-319-91590-6. Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-91590-6_6.

CASKA, Serkan; GAYRETLI, Ahmet. A survey of UAV / UGV collaborative systems. **CIE44 & IMSS'14 Proceedings**, n. January 2014, 2014.

CERÓN, Alexander; MONDRAGÓN, Iván; PRIETO, Flavio. Onboard visual-based navigation system for power line following with UAV. **International Journal of Advanced Robotic Systems**, v. 15, n. 2, p. 1–12, 2018. ISSN 17298814.

CHANG, W.; YANG, G.; YU, J.; LIANG, Z.; CHENG, L.; ZHOU, C. Development of a power line inspection robot with hybrid operation modes. *In: 2017 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*. [S.l.: s.n.], 2017. p. 973–978.

EMLID. **ROS driver for the Reach RTK GNSS module**. 2018. Disponível em: https://github.com/rpng/reach_ros_node. Acesso em: 30/09/2020.

EMLID. **EMLID REACH DOCUMENTATION WEB SITE**. 2019. Disponível em: <https://docs.emlid.com/reach/#discussion>. Acesso em: 30/05/2019.

EMLID. **EMLID web site**. 2019. Disponível em: <https://emlid.com/>. Acesso em: 30/05/2019.

GARMIN. **Folha de dados do sensor Lidar Lite V3**. 2020. Disponível em: <https://www.garminstore.com>. Acesso em: 14 nov. 2020.

GARRIDO-JURADO, Sergio; SALINAS, Rafael Munõz; MADRID-CUEVAS, Francisco; MARÍN-JIMÉNEZ, Manuel. Automatic generation and detection of highly reliable fiducial markers under occlusion. **Pattern Recognition**, v. 47, p. 2280–2292, 06 2014.

GARZÓN, Mario; VALENTE, Joao; ZAPATA, David; CHIL, Rigoberto; BARRIENTOS, Antonio. Towards a Ground Navigation System based in Visual Feedback provided by a Mini UAV. **IEEE Intelligent Vehicles Symposium Workshops**, 2012.

GIBBINGS, P.; MANUEL, B.; PENINGTON, Rafe; MCDOUGALL, K. Assessing the accuracy and integrity of rtk gps beneath high voltage power lines. *In: 42 Australian Surveyors Congress. [S.l.: s.n.], 2001.*

HOOD, Shannon; BENSON, Kelly; HAMOD, Patrick; MADISON, Daniel; O’KANE, Jason M.; REKLEITIS, Ioannis. Bird’s eye view: Cooperative exploration by UGV and UAV. *In: 2017 International Conference on Unmanned Aircraft Systems, ICUAS 2017. [S.l.: s.n.], 2017. p. 247–255. ISBN 9781509044948.*

HRABAR, S.; MERZ, T.; FROUSHEGER, D. Development of an autonomous helicopter for aerial powerline inspections. *In: 2010 1st International Conference on Applied Robotics for the Power Industry. [S.l.: s.n.], 2010. p. 1–6.*

HUERTAS, J. I.; BARRAZA, R.; ECHEVERRY, J. M. Wireless data transmission from inside electromagnetic fields. *In: 2009 6th International Conference on Electrical Engineering, Computing Science and Automatic Control (CCE). [S.l.: s.n.], 2009. p. 1–7.*

ILAS, C. Electronic sensing technologies for autonomous ground vehicles: A review. *In: 2013 8TH International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE). [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6.*

LABORATORY, APRIL Robotics. **AprilTags Visual Fiducial System**. 2018. Disponível em: <https://april.eecs.umich.edu/software/apriltag>. Acesso em: 20/11/2019.

LACROIX, Simon; BESNERAIS, Guy Le. Issues in Cooperative Air / Ground Robotic. **Robotics Research. Springer Tracts in Advanced Robotics**, 2010.

LARRAURI, Juan I.; SORROSAL, Gorka; GONZALEZ, Mikel. Automatic system for overhead power line inspection using an Unmanned Aerial Vehicle RELIFO project. **2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)**, Ieee, p. 244–252, may 2013.

LI, H.; WANG, B.; LIU, L.; TIAN, G.; ZHENG, T.; ZHANG, J. The design and application of smartcopter: An unmanned helicopter based robot for transmission line inspection. *In: 2013 Chinese Automation Congress. [S.l.: s.n.], 2013. p. 697–702.*

LIANG, Xiao; CHEN, Guodong; ZHAO, Shirou; XIU, Yiwei. Moving target tracking method for unmanned aerial vehicle/unmanned ground vehicle heterogeneous system based on AprilTags. **Measurement and Control (United Kingdom)**, 2020. ISSN 00202940.

LUQUE-VEGA, Luis F.; CASTILLO-TOLEDO, Bernardino; LOUKIANOV, Alexander; GONZALEZ-JIMENEZ, Luis Enrique. Power line inspection via an unmanned aerial system based on the quadrotor helicopter. **Proceedings of the Mediterranean Electrotechnical Conference - MELECON**, p. 393–397, 2014.

MÁTHÉ, Koppány; BUSONIU, Lucian. Vision and control for UAVs: A survey of general methods and of inexpensive platforms for infrastructure inspection. **Sensors (Switzerland)**, v. 15, n. 7, p. 14887–14916, 2015. ISSN 14248220.

MONAJJEMI, Mani. **ROS Driver for Parrot Bebop Drone (quadcopter) 1.0 e 2.0**. 2015. Disponível em: <https://bebop-autonomy.readthedocs.io/en/latest/#>. Acesso em: 30/05/2019.

MUSKARDIN, Tin; BALMER, Georg; PERSSON, Linnea; WLACH, Sven; LAIACKER, Maximilian; OLLERO, Anibal; KONDAK, Konstantin. A Novel Landing System to Increase Payload Capacity and Operational Availability of High Altitude Long Endurance UAVs. **Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications**, v. 88, n. 2-4, p. 597–618, 2017. ISSN 15730409.

NGUYEN, Phong Ha; KIM, Ki Wan; LEE, Young Won; PARK, Kang Ryoung. Remote marker-based tracking for uav landing using visible-light camera sensor. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 9, 2017. ISSN 14248220.

NGUYEN, Van Nhan; JENSSEN, Robert; ROVERSO, Davide. Automatic autonomous vision-based power line inspection: A review of current status and the potential role of deep learning. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, Elsevier, v. 99, n. January, p. 107–120, 2018. ISSN 01420615.

NIEKUM, Scott. **ar_track_alvar Ros Package**. 2019. Disponível em: http://wiki.ros.org/ar_track_alvar. Acesso em: 30/05/2019.

NONAMI, Kenzo; KARTIDJO, Muljowidodo; YOON, Kwang-Joon; BUDIYONO, Agus. Autonomous Control Systems and Vehicles - Intelligent Unmanned Systems. **International Series on Intelligent Systems, Control and Automation: Science and Engineering**, v. 65, p. 306, 2013. ISSN 2213-8986.

PARK, Joon-Young; KIM, Seok-Tae; LEE, Jae-Kyung; HAM, Ji-Wan; OH, Ki-Yong. Method of operating a gis-based autopilot drone to inspect ultrahigh voltage power lines and its field tests. **Journal of Field Robotics**, v. 37, n. 3, p. 345–361, 2020.

PARROT. **Parrot for Developers**. 2019. Disponível em: <https://developer.parrot.com>. Acesso em: 30/03/2020.

PFEIFFER, Sammy. **Video Stream Open-CV Package**. 2019. Disponível em: http://wiki.ros.org/video_stream_opencv. Acesso em: 30/10/2020.

RAFIQUE, Syed Furqan; BODLA, Muhammad Kamran; AHMED, Zohaib; NASIR, Usman; ZAIDI, Aun; SALEEM, Muhammad. Design and implementation of a UAV for power system utility inspection. **2014 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition**, Ieee, p. 1146–1150, sep 2014.

RESENDE, Eng Gerson Vale de. **Segurança na manutenção de linhas de alta tensão - Painel: Segurança, Meio Ambiente e Saúde 28/11/2017 XVI – Rio de Janeiro - RJELETRORBRAS FURNAS**. . [S.l.]: Seminário Nacional de Telecomunicações –APTEL / PETROBRAS, 2017.

RIZK, Yara; AWAD, Mariette; TUNSTEL, Edward W. Cooperative heterogeneous multi-robot systems: A survey. **ACM Computing Surveys**, v. 52, n. 2, 2019. ISSN 15577341.

ROBOTS, Generation. **Pioneer P3 mobile robot**. 2020. Disponível em: <https://www.generationrobots.com/en/402395-robot-mobile-pioneer-3-dx.html>. Acesso em: 30/09/2020.

ROSIQUE, Francisca; NAVARRO, Pedro J.; FERNÁNDEZ, Carlos; PADILLA, Antonio. A systematic review of perception system and simulators for autonomous vehicles research. **Sensors**, MDPI AG, v. 19, n. 3, p. 648, Feb 2019. ISSN 1424-8220.

ROS.ORG. **The Robot Operating System (ROS)**. Disponível em: <http://www.ros.org>. Acesso em: 30/05/2019.

ROYO, Santiago; BALLESTA-GARCIA, Maria. An overview of lidar imaging systems for autonomous vehicles. **Applied Sciences**, MDPI AG, v. 9, n. 19, p. 4093, Sep 2019. ISSN 2076-3417. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/app9194093>.

SANTOS, Marcos. **Imagem de um conjunto de torres de distribuição de energia**. 2020. Disponível em: {http://imagens.usp.br/?attachment_id=2152}.

SCHLEUNING, David; DROZ, Pierre-Yves. Lidar sensors for autonomous driving. *In*: ZEDIKER, Mark S. (Ed.). **High-Power Diode Laser Technology XVIII**. SPIE, 2020. v. 11262, p. 89 – 94. Disponível em: <https://doi.org/10.1117/12.2559807>.

SHAKHATREH, H.; Sawalmeh, A. H.; Al-Fuqaha, A.; Dou, Z.; Almaita, E.; Khalil, I.; Othman, N. S.; Khreishah, A.; Guizani, M. Unmanned aerial vehicles (uavs): A survey on civil applications and key research challenges. **IEEE Access**, v. 7, p. 48572–48634, 2019.

SISTEMA, Operador Nacional do. **Mapa dinâmico do SIN**. 2020. Disponível em: <http://www.ons.org.br/paginas/sobre-o-sin/mapas>. Acesso em: 14 nov. 2020.

TEAM, Ardupilot Dev. **Building for Bebop 2**. 2019. Disponível em: {<http://ardupilot.org/ardupilot/docs/common-history-of-ardupilot.htm>}. Acesso em: 28/10/2020.

VIÑA, Carlos; MORIN, Pascal. Micro air vehicle local pose estimation with a two-dimensional laser scanner: A case study for electric tower inspection. **International Journal of Micro Air Vehicles**, v. 10, n. 2, p. 127–156, 2018. ISSN 17568307.

VTT, Technical Research Centre. **Augmented Reality / 3D Tracking**. 2017. Disponível em: <http://virtual.vtt.fi/virtual/proj2/multimedia/>. Acesso em: 30/05/2019.

WASHINGTON, HIT Lab-University of. **ARToolKit**. 2018. Disponível em: <http://www.hitl.washington.edu/artoolkit/>. Acesso em: 30/07/2018.

XIE, Xiaowei; LIU, Zhengjun; XU, Caijun; ZHANG, Yongzhen. A multiple sensors platform method for power line inspection based on a large unmanned helicopter. **Sensors (Switzerland)**, v. 17, n. 6, p. 1–17, 2017. ISSN 14248220.

XU, Lingyun; LUO, Haibo. Towards autonomous tracking and landing on moving target. *In: 2016 IEEE International Conference on Real-Time Computing and Robotics, RCAR 2016. [S.l.: s.n.], 2016. p. 620–628. ISBN 9781467389594.*

ZIMMERMANN, F.; ELING, C.; KLINGBEIL, L.; KUHLMANN, H. Precise positioning of uavs - dealing with challenging rtk-gps measurement conditions during automated uav flights. **ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 4, n. 23, p. 95–102, 2017. ISSN 21949050.