



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES

FELIPE AUGUSTO CORTEZ MUNIZ DA SILVA

**UM PROTÓTIPO DE GÊMEO DIGITAL PARA  
SIMULAÇÃO E CONTROLE DE DRONES**

NATAL/RN

2023

FELIPE AUGUSTO CORTEZ MUNIZ DA SILVA

**UM PROTÓTIPO DE GÊMEO DIGITAL PARA  
SIMULAÇÃO E CONTROLE DE DRONES**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações (CETEL) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Dr. Cláudio Rodrigues Muniz da Silva.

NATAL/RN

2023

## **UM PROTÓTIPO DE GÊMEO DIGITAL PARA SIMULAÇÃO E CONTROLE DE DRONES**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia de Telecomunicações (CETEL) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Telecomunicações.

Aprovada em: 05/07/2023

### **BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. Cláudio Rodrigues Muniz da Silva  
Orientador

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Prof. Dr. Laércio Martins de Mendonça  
Membro interno

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

Prof. Dr. Fábio Augusto Procópio de Paiva  
Membro externo

INSTITUTO FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE



## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por sua presença constante em minha vida.

Agradeço também à minha família, em especial aos meus pais, por todo o apoio, amor e incentivo ao longo dessa árdua jornada.

Aos meus irmãos Lucas Matheus e Letícia Augusta, pelo carinho, incentivo e bons momentos vividos.

Aos meus avós, Márcio e Terezinha, Múcio e Maria Ana. Tenho orgulho de dar continuidade à linhagem, obrigado por tanto.

Agradeço à UFRN por todo suporte e apoio durante todos esses anos, oferecendo a estrutura necessária, instalações e ensino de qualidade.

Agradeço a todo corpo docente, composto por excelentes professores e profissionais, que estiveram sempre dispostos a contribuir ao longo dessa jornada de formação como aluno e profissional, os professores da Escola de Ciência e Tecnologia, os professores do Departamento de Comunicações e especialmente, ao meu orientador e mentor, professor Cláudio Rodrigues Muniz da Silva.

Aos meus colegas de turma, que durante esses anos mantiveram uma relação mútua de incentivo durante a graduação, especialmente nessa reta final.

Aos meus amigos de infância, Lucas, Mendes, Rodrigo, Guanais, João Victor, Matheus, Pedro e Khalil, o apoio deles foi essencial.

Se cheguei até aqui, foi porque me  
apoiei no ombro de gigantes.

Isaac Newton



## RESUMO

O desenvolvimento da tecnologia utilizada nos drones e suas aplicações diversas em diferentes setores da atividade humana emergiram como uma alternativa promissora aos métodos convencionais utilizados até então. Apesar de todas as possibilidades promissoras que abordagens baseadas em drones possibilitam, o projeto e a implementação de algoritmos de controle programáveis para drones tem sido uma tarefa cada vez mais complexa e desafiadora, devido à necessidade de considerar vários fatores, como dinâmica de voo, sensores embarcados, comunicação e interação com o ambiente. No contexto de drones programáveis, um gêmeo digital pode reproduzir as características e o comportamento de um drone real, permitindo a experimentação e o ajuste dos algoritmos de controle sem o risco de danificar equipamentos ou colocar vidas em perigo. Um gêmeo digital é uma representação virtual de um sistema físico ou processo em tempo real. Este trabalho apresenta um protótipo de gêmeo digital baseado no comportamento de um Veículo Aéreo Não Tripulado (VANT) indoor. A metodologia utilizada neste trabalho define cinco etapas específicas para a especificação e implementação de um protótipo funcional, que é posteriormente desenvolvido em um processo de desenvolvimento de protótipo. Os resultados são promissores e permitiram a operação satisfatória do gêmeo digital, em substituição a um drone real, em vários cenários de validação.

**Palavras-chave:** Gêmeo digital, VANT, Drones, Veículo Aéreo não tripulado.



## **ABSTRACT**

Drone development and their applications has emerged as a promising technology in various domains of human activity. They have been used in different domains such as package deliveries, remote area monitoring, industrial inspections and aerial mapping. Despite all the promising possibilities that drone based approaches enable, the design and implementation of programmable drone control algorithms can be challenging, due to the need to consider several factors, such as flight dynamics, onboard sensors, communication and interaction with the environment. In the context of programmable drones, a digital twin can reproduce the characteristics and behavior of a real drone, allowing experimentation and adjustment of control algorithms without the risk of damaging equipment or endangering lives. A digital twin is a virtual representation of a physical system or process in real time. This work presents a prototype of digital twin based in the behavior of an indoor UAV (Unmanned Aerial Vehicle). The methodology used in this work defines five specific steps towards the specification and implementation of a functional prototype that is further developed in a prototype development process. The results are promising and enabled the satisfactory operation of the digital twin, in substitution of a real drone, in several validation scenarios.

**Keywords:** Digital twins, UAVs, VANTs, Drones, Unmanned Aerial vehicles.

## LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 -	Etapas da metodologia utilizada no trabalho	18
Figura 2 -	Cenários de casos de uso para o controle do DTP.	18
Figura 3 -	Cenário de caso de uso para automação do IPD.	19
Figura 4 -	Eixos, movimentos e empuxo para um drone quadcóptero	20
Figura 5 -	a) Movendo nas direções z, x e y e b) Matriz de Rotação	23
Figura 6 -	Interface gráfica utilizada para controlar o protótipo	32
Figura 7 -	Interface gráfica utilizada para controlar o protótipo e capturar a sua posição	33
Figura 8 -	O protótipo 3D sendo apresentado na forma renderizada	33
Figura 9 -	Interface gráfica usada para controlar o IPD durante as rotações de inclinação (pitch).	36
Figura 10 -	Interface gráfica usada para controlar o IPD durante as rotações de inclinação a partir de um ponto de vista diferente.	36
Figura 11 -	Interface gráfica usada para controlar o IPD durante as rotações de inclinação a partir de um ponto de vista diferente.	36
Figura 12 -	Interface gráfica usada para controlar o DTP mostrando-o em execução na realidade aumentada.	37
Figura 13 -	Diagrama mostrando o movimento do IPD ao longo da automação de demonstração acionada após o botão "Demo".	38
Figura 14 -	Caminhos observados para o DTP e o IPD nas experimentações.	39

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>12</b>
<b>2</b>	<b>TRABALHOS RELACIONADOS .....</b>	<b>15</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>18</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>35</b>
<b>5</b>	<b>DISCUSSÃO .....</b>	<b>40</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>42</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>43</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o desenvolvimento de drones e suas aplicações emergiram como uma tecnologia promissora em vários domínios da atividade humana. Eles têm sido utilizados em diferentes áreas, como entregas de pacotes, monitoramento de áreas remotas, inspeções industriais e mapeamento aéreo. A capacidade de programar e controlar drones autonomamente tem sido um dos principais avanços nesse campo, permitindo a realização eficiente e precisa de tarefas complexas.

Um drone é essencialmente uma aeronave não tripulada. Eles são mais formalmente conhecidos como Veículos Aéreos Não Tripulados (VANTs) ou sistemas de aeronaves não tripuladas e podem ser definidos como um sistema eletromecânico que não possui um operador humano a bordo [1].

Apesar de todas as possibilidades promissoras que as abordagens baseadas em drones possibilitam, o projeto e a implementação de algoritmos de controle programáveis para drones podem ser desafiadores, devido à necessidade de considerar vários fatores, como a dinâmica de voo, sensores embarcados, comunicação e interação com o ambiente. Para superar esses desafios, o uso de gêmeos digitais surgiu como uma abordagem promissora [2].

Um gêmeo digital é uma representação virtual de um sistema físico ou processo em tempo real [3]. Esta representação permite a simulação e modelagem computacional precisa do comportamento do sistema real, fornecendo uma plataforma de teste segura e eficiente para o desenvolvimento e validação de algoritmos de controle.

No contexto de drones programáveis, um gêmeo digital pode reproduzir as características e o comportamento de um drone real, permitindo a experimentação e o ajuste de algoritmos de controle sem o risco de danificar equipamentos ou colocar vidas em perigo.

Os gêmeos digitais também têm o potencial de aprimorar significativamente as atividades e pesquisas no campo das telecomunicações. Isso é especialmente visível em contextos de treinamento e simulação, pois os

gêmeos digitais podem servir como ambientes virtuais para o treinamento de profissionais de telecomunicações. Eles podem ser usados para replicar cenários e configurações de redes do mundo real. Os gêmeos digitais fornecem um ambiente seguro e controlado para a prática de solução de problemas, otimização de redes e implantação de novas tecnologias [4].

Um gêmeo digital deve possuir algumas características essenciais para garantir que forneça uma representação precisa do sistema físico, ofereça capacidades preditivas e prescritivas, apoie a tomada de decisões e evolua junto com o sistema que representa [5]. Essas características são: a) representação virtual; b) integração de dados em tempo real; c) análise preditiva e prescritiva; d) suporte à decisão e virtualização; e) dinâmico e evolutivo.

Os gêmeos digitais necessitam de uma representação virtual, pois devem representar com precisão os aspectos-chave e os comportamentos do sistema físico que se destinam a emular. Isso inclui capturar as características essenciais, funcionalidades e dinâmicas do sistema físico. Sem uma representação virtual fiel, o gêmeo digital não espelharia efetivamente o comportamento do sistema físico.

A integração de dados em tempo real é essencial para um gêmeo digital, pois fornece a capacidade de integrar e utilizar dados em tempo real. Os dados em tempo real garantem que o gêmeo reflita o estado atual e o desempenho do sistema físico, permitindo monitoramento, análise e tomada de decisões em tempo real. Sem a integração de dados em tempo real, o gêmeo não teria as informações atualizadas necessárias para fornecer insights e previsões precisas.

A análise preditiva e prescritiva também é uma característica fundamental dos gêmeos digitais. Ao aproveitar dados históricos e em tempo real, o gêmeo pode gerar previsões sobre comportamentos futuros, identificar oportunidades de otimização e fornecer recomendações para a tomada de decisões. A análise preditiva e prescritiva capacita os usuários a abordar proativamente problemas e otimizar o desempenho do sistema.

A capacidade de suporte à decisão permite que os usuários compreendam informações complexas e tomem decisões informadas com base nos resultados do gêmeo digital. O suporte à decisão eficaz e a visualização aprimoram a usabilidade e o valor prático do gêmeo digital.

A capacidade de adaptação, aprendizado e evolução também é importante para que um gêmeo digital permaneça relevante e eficaz ao longo do tempo. Atualizações contínuas, calibração e refinamento com base em novos dados, feedback e experiências garantem que os modelos e previsões do gêmeo melhorem e se alinhem com as características do sistema físico.

A criação de um protótipo de gêmeo digital normalmente envolve a aplicação de uma metodologia específica, que visa desenvolver uma representação virtual precisa de um sistema físico em tempo real [6][7][8].

Independentemente da metodologia utilizada, ela deve considerar as características essenciais de um típico gêmeo digital. Além disso, ao longo de todo o processo, a comunicação efetiva, o compartilhamento de conhecimento interdisciplinar e uma abordagem iterativa são fundamentais para o desenvolvimento de gêmeos digitais de alta qualidade que ofereçam insights valiosos e suporte à tomada de decisões em aplicações do mundo real.

Este trabalho apresenta um protótipo de gêmeo digital baseado no comportamento de um VANT (Veículo Aéreo Não Tripulado) indoor, que foi projetado para ser usado em dois cenários operacionais. a) O protótipo substitui um VANT real em sua interação com suas aplicações de controle, a fim de permitir a realização de vários testes sem o uso de VANTs caros e personalizados; e b) O protótipo é usado em combinação com o seu correspondente VANT real para verificar o quão precisa e completa foi sua especificação em comparação com um VANT físico em voo.

O artigo está organizado da seguinte forma: Na seção II, são apresentados os trabalhos relacionados encontrados na literatura sobre a utilização do conceito de gêmeos digitais em diferentes casos de uso; Na seção III, é detalhada a metodologia utilizada neste trabalho, bem como suas etapas de execução. Na seção IV, são descritos os resultados observados para os três cenários considerados no trabalho. Na seção V, é feita uma breve discussão sobre o assunto, mostrando as principais implicações para os resultados apresentados na seção VI. Por fim, na seção VII, são apresentadas as principais conclusões e trabalhos futuros que podem dar continuidade ao trabalho apresentado.

## **2 TRABALHOS RELACIONADOS**

### **2.1 Design, Modeling and Implementation of Digital Twins**

O artigo [11] propõe um procedimento de três etapas que corresponde à ordem cronológica das atividades necessárias para implementar um DT. A primeira etapa explica como projetar um DT, ou seja, como definir os requisitos funcionais e a arquitetura do sistema. A segunda etapa explica como modelar um DT. Essa etapa requer a criação de modelos de sistema que representem diferentes aspectos do PO e sua integração. Finalmente, a terceira etapa explica como implementar um DT, ou seja, quais são as plataformas, estruturas e ferramentas existentes para desenvolver um DT, como sincronizar os dados entre objetos físicos e virtuais e os protocolos e padrões de comunicação existentes para a troca de informações.

### **2.2 Methodology for Digital Twin Use Cases: Definition, Priorization, and Implementation**

Este artigo [12] propõe uma abordagem de gerenciamento para priorizar casos de uso de Digital Twin adequados para o planejamento de aplicações de Digital Twin em uma fase inicial de desenvolvimento. Levando em consideração a satisfação das partes interessadas, a escalabilidade da infraestrutura e o esforço necessário para implementação e manutenção, apresentamos uma metodologia para determinar os casos de uso de Digital Twin mais impactantes que requerem baixo esforço e alta escalabilidade. Descrevendo ferramentas e métodos relacionados dos campos de desenvolvimento de software, inovação, engenharia de processos e desenvolvimento de produtos, e discutindo a metodologia em relação a esses e outros trabalhos de pesquisa. Um exemplo de desenvolvimento de produto mecatrônico no Siemens Healthineers Innovation Think Tank valida a abordagem.

### **2.3 Adaptive Edge Association for Wireless Digital Twin Networks in 6G**

Este artigo [13] discute a integração de gêmeos digitais com redes de borda para permitir experiências hiperconectadas e computação de borda de baixa latência na era futura do 6G. O artigo propõe um modelo de rede de borda de gêmeos digitais sem fio e aborda os desafios de construir e manter gêmeos

digitais em ambientes de rede dinâmicos. No entanto, é importante notar que o artigo ainda não foi totalmente editado e seu conteúdo pode mudar antes da publicação final.

## **2.4 Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models**

Este artigo [14] realiza um levantamento do estado da arte do conceito de Digital Twin, começando pela definição original na indústria manufatureira. São consideradas propostas relacionadas que surgem em outros campos, como Realidade Aumentada e Virtual (por exemplo, avatares), sistemas multiagentes e virtualização. Esse levantamento permite a identificação de um extenso conjunto de recursos do Digital Twin que apontam para a "softwarização" de objetos físicos. Para consolidar adequadamente uma definição compartilhada de Digital Twin, um conjunto de propriedades fundamentais é identificado e proposto como base comum para delinear as características essenciais de um Digital Twin. Uma vez consolidada a definição de Digital Twin, seu valor técnico e comercial é discutido em termos de aplicabilidade e oportunidades. Quatro cenários de aplicação ilustram como o conceito de Digital Twin pode ser utilizado e como algumas indústrias estão aplicando-o. Os cenários também levam a um Modelo Arquitetural Genérico para Digital Twin. Essa análise é complementada pela identificação de modelos e diretrizes de arquitetura de software, a fim de apresentar uma estrutura funcional geral para o Digital Twin. O artigo, por fim, analisa um conjunto de possíveis caminhos de evolução para o Digital Twin, considerando seu uso como um importante facilitador do processo de criação de software específicos para este contexto de aplicação.

## **2.5 Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research**

Neste trabalho [15], uma revisão das publicações relacionadas a Digital Twins é realizada, produzindo uma revisão categorizada dos artigos recentes. A revisão categoriza os artigos por área de pesquisa: Manufatura, Saúde e Cidades Inteligentes. São discutidos diversos artigos que refletem essas áreas e o estado atual da pesquisa. O artigo delinea as oportunidades e desafios de pesquisa em aberto.



## **2.6 A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications**

Este artigo [16] apresenta os resultados de um estudo focado na análise das definições de estado da arte de DT, na investigação das principais características que um DT deve possuir e na exploração dos domínios em que as aplicações de DT estão sendo desenvolvidas atualmente. As implicações de design derivadas do estudo são apresentadas, com foco nos aspectos de design sócio-técnico e ciclo de vida do DT. Por fim, são discutidas questões em aberto e desafios que precisam ser abordados no futuro.

## **2.7 Considerações sobre os trabalhos relacionados**

Embora não tenha sido encontrado, até a data da publicação deste trabalho, uma tentativa específica de aplicação do conceito de gêmeos digitais para o controle de drones na literatura estudada, os trabalhos relacionados apresentados nesta seção foram fundamentais para a elaboração dos elementos essenciais na definição da metodologia apresentada para a criação do protótipo de gêmeo digital desejado neste trabalho.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia utilizada neste trabalho define cinco etapas específicas para a especificação e implementação de um protótipo funcional. Essas etapas são: a) Especificação de objetivos; b) Análise do sistema; c) Aquisição de dados e seleção do modelo; d) Integração e validação do modelo; e, por fim, e) Interfaces de usuário e implementação. Ver diagrama de fluxo abaixo:

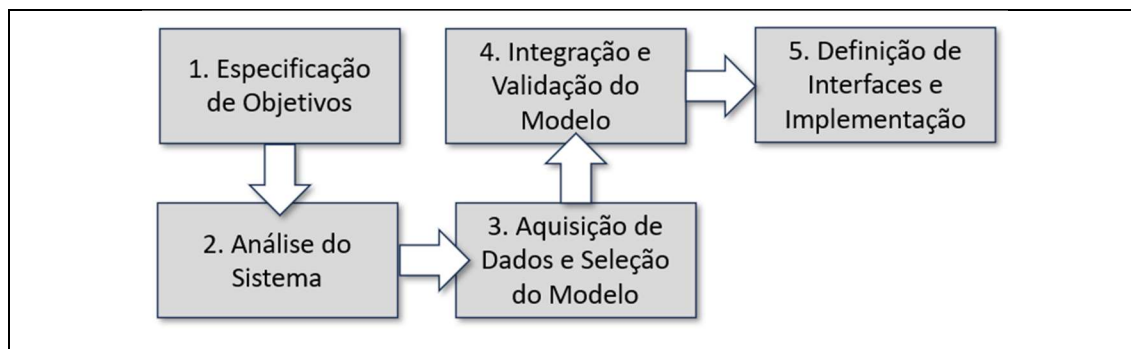


Figura 1 – Etapas da metodologia adotada.

#### 3.1 Especificação de objetivos

O primeiro passo é definir o propósito e o objetivo do gêmeo digital. Isso significa identificar o sistema físico, seus aspectos de virtualização e determinar metas específicas a serem alcançadas. O sistema físico a ser modelado é um drone programável indoor (IPD, na sigla em inglês).

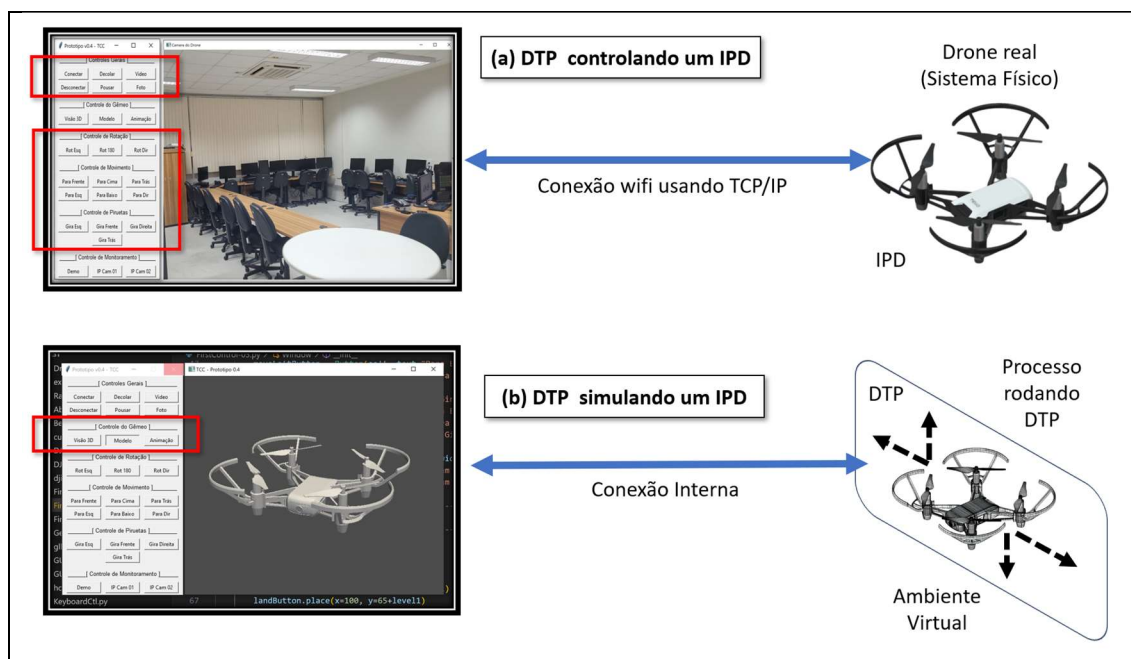


Figura 2 - Cenários de casos de uso para o controle do DTP.

Sua virtualização é o protótipo de gêmeo digital (DTP) projetado e implementado neste trabalho. Eles são destinados a serem usados em três cenários específicos: a) O DTP deve ser capaz de atuar como um controlador remoto para o IPD (Fig. 2a); b) O DTP deve ser capaz de manipular graficamente uma representação virtual para o IPD (Gêmeo Digital), permitindo todos os movimentos que um drone real é capaz de fazer (Fig. 2b); e c) O DTP deve ser capaz de criar e registrar sequências pré-definidas de movimentos para o IPD (Fig. 3).

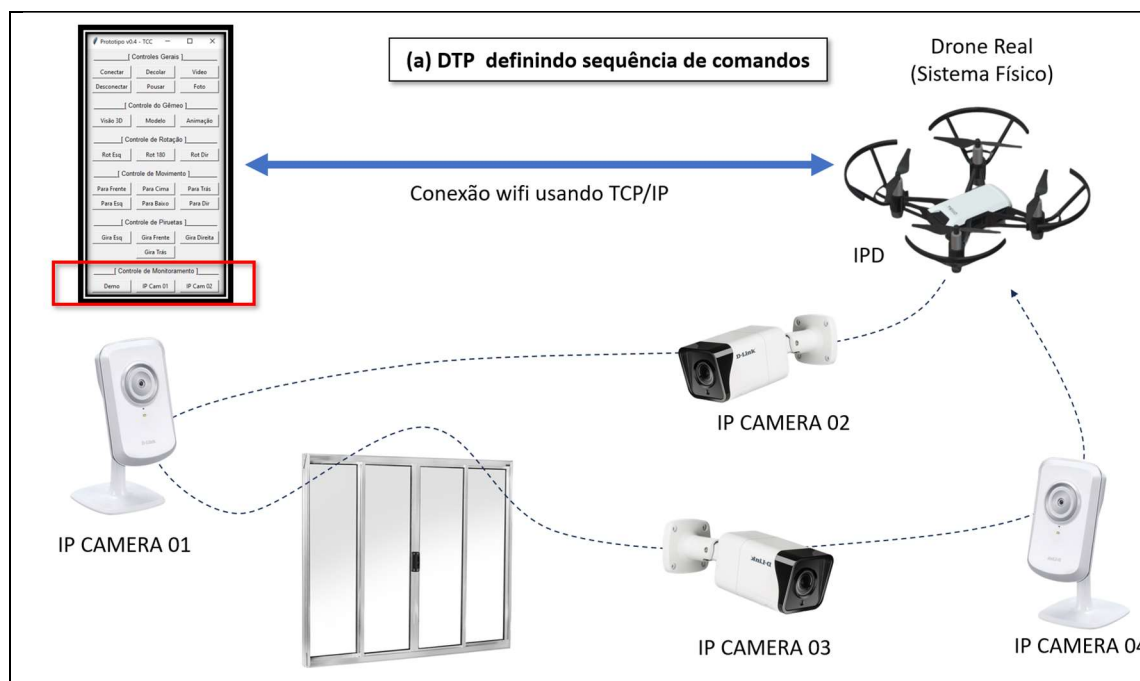


Figura 3 - Cenário de caso de uso para automação do IPD.

Na Figura 2 (a), o protótipo substitui um controlador de drone real. Ele deve fazer com que um drone quadricóptero execute todos os movimentos possíveis que um drone quadricóptero pode executar. São eles:

1. *Hovering* (Manter-se no ar): O drone mantém uma posição estável no ar sem nenhum movimento horizontal ou vertical significativo.
2. *Vertical Ascend/Descend* (Ascender/Descender Verticalmente): O drone pode mover-se para cima ou para baixo verticalmente ajustando o impulso dos rotores.
3. *Roll* (Inclinação Lateral): O drone pode inclinar-se para um dos lados, criando um movimento de inclinação ao redor do eixo de rolagem.

4. *Pitch* (Inclinação Longitudinal): O drone pode inclinar-se para frente ou para trás, causando um movimento de inclinação ao redor do eixo de arfagem.

5. *Yaw* (Giro): O drone pode girar ao redor de seu eixo vertical, resultando em um movimento de giro. Isso permite que o drone mude sua direção ou orientação.

6. *Translational Movement* (Movimento Translacional): O drone pode mover-se horizontalmente em qualquer direção ajustando a velocidade dos rotores individuais. Ele pode ir para frente, para trás, para os lados (esquerda ou direita) ou diagonalmente.

7. *Flips and Rolls* (Giros e Rolamentos): Alguns drones avançados têm a capacidade de executar manobras acrobáticas, incluindo giros e rolamentos, que envolvem rotações rápidas ao redor de diferentes eixos.

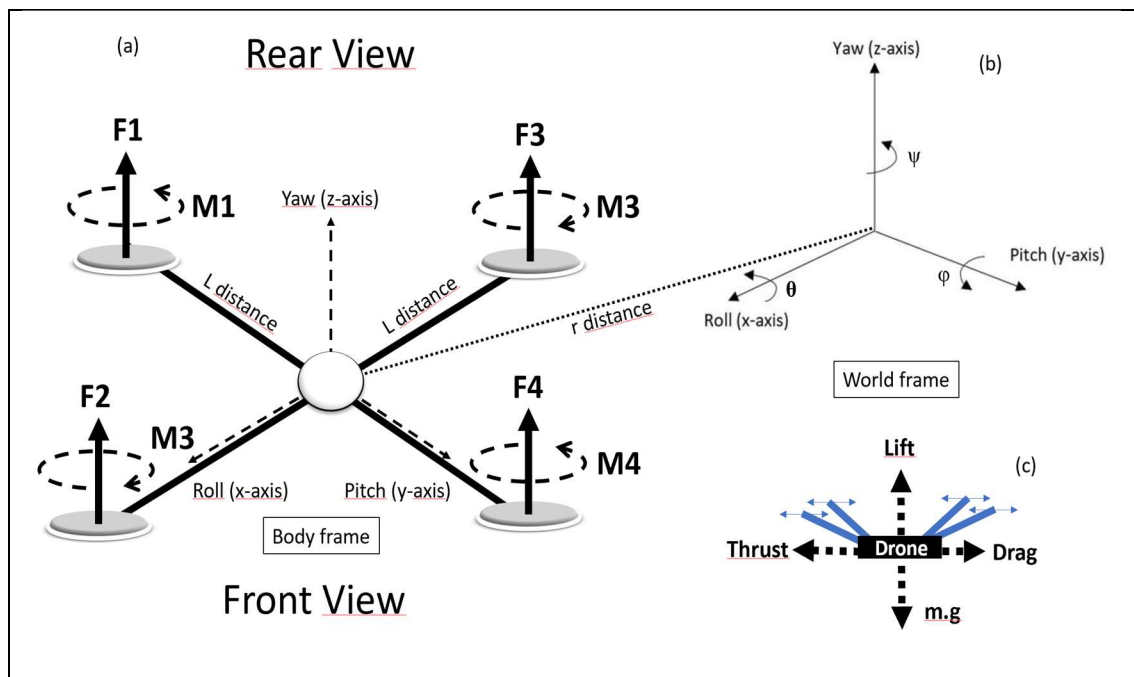


Figura 4 - Eixos, movimentos e empuxo para um drone quadróptero.

Na Figura 2 (b), o protótipo é usado para controlar uma representação digital do IPD implementado por um modelo 3D criado a partir de um conjunto de cinquenta fotografias tiradas de um drone real. O número de fotografias necessário para reproduzir um objeto real em três dimensões varia. Depende da quantidade de detalhes a ser detalhado para que o objeto 3D resultante fique

sem áreas de sombras. No caso do drone usado, as cinquenta fotos foram mais do que suficientes para que o objeto resultante ficassem sem áreas de sombra.

As fotografias do drone real (dji tello) são utilizadas por um programa especial no laboratório (software RealityCapture) para criar um arquivo de objeto 3D que é usado como representação digital do IPD real modelado neste trabalho. Nesse cenário, o usuário deve usar um mouse ou um teclado para mover o protótipo de acordo com o que seria esperado para a operação do drone modelado.

### **3.2 Análise do Sistema**

Na análise de compreensão do sistema, o objetivo é obter uma compreensão profunda do sistema físico e do protótipo de gêmeo digital. Isso envolve estudar seu comportamento, estrutura, componentes e interações. Para o IPD considerado neste trabalho, esse comportamento deve levar em consideração a natureza de um drone quadróptero e os possíveis movimentos que ele deve realizar. As equações desse comportamento dependem dessa natureza e estrutura do drone modelado.

#### **3.2.1. Forças e Momentos**

Durante a operação de um drone quadróptero, cada hélice rotativa produz dois tipos de forças: empuxo e momento. Quando um rotor gira, sua hélice produz um empuxo para cima e uma rotação oposta chamada de Torque ou Momento. Quando um rotor gira, sua hélice produz um empuxo para cima dado por:

$$F = K_f * \omega^2 \quad (1)$$

Onde  $\omega$  (ômega) é a taxa de rotação do rotor e a constante  $K_f$  depende de diversos fatores e é definida empiricamente. O empuxo total gerado por todas as quatro hélices é dado pela soma dos empuxos individuais gerados, para  $i = 1$  a 4, é dado por:

$$F = \sum F_i \quad (2)$$

Onde  $F_i$  é:

$$F_i = K_f * \omega_i^2 \quad (3)$$

Além disso, uma hélice em rotação também gera uma rotação oposta chamada de Torque ou Momento. Esse torque rotacional é dado por:

$$M = K_m * \omega^2 \quad (4)$$

Onde  $K_m$  é outra constante cujo valor também é encontrado empiricamente.

O momento total gerado por todas as quatro hélices é dado pela soma dos momentos individuais gerados, para  $i = 1$  a 4, é dado por:

$$M_i = K_m * \omega_i^2 \quad (5)$$

Os momentos  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$  e  $M_4$  são momentos gerados pelos motores individuais. O momento geral gerado em torno do eixo z do drone é dado pela soma de todos os 4 momentos.

$$M_z = \sum_{i=1}^4 M_i \quad (6)$$

Para manter-se em um voo estacionário, o momento  $M_z$  deve ser zero. Caso contrário, o drone irá rolar no sentido horário ou anti-horário. Ao contrário do momento  $M_z$ , o cálculo do momento geral gerado em torno dos eixos x e y é feito de maneira diferente.

Ao observar a Figura 4, pode-se ver que os motores 1 e 3 estão localizados no eixo x do drone. Portanto, eles não contribuirão para nenhum momento/torque em torno do eixo x.

No entanto, pode-se ver que a diferença nas forças geradas pelos motores 2 e 4 fará com que o corpo do drone incline em torno de seu eixo x, e isso é o que constitui o momento/torque geral em torno do eixo x, dado por:

$$M_x = (F_2 - F_4) * L \quad (7)$$

onde  $L$  é a distância entre o eixo de rotação dos rotores e o centro do drone quadróptero. Da mesma forma,

$$\mathbf{M}_y = (F_3 - F_1) \cdot L \quad (8)$$

Resumindo, o momento total (MT) em torno dos três eixos pode ser representado pelo vetor abaixo:

$$\mathbf{M}_T = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

### 3.2.2 Orientação e Posição

Um drone possui atributos de posição e orientação. Isso significa que ele pode estar em qualquer posição determinada por coordenadas x, y, z e pode fazer certos ângulos (theta ( $\theta$ ), phi ( $\phi$ ) e psi ( $\psi$ )) em relação ao referencial inercial para definir uma direção de orientação. Esses ângulos são mostrados na figura 5, abaixo:

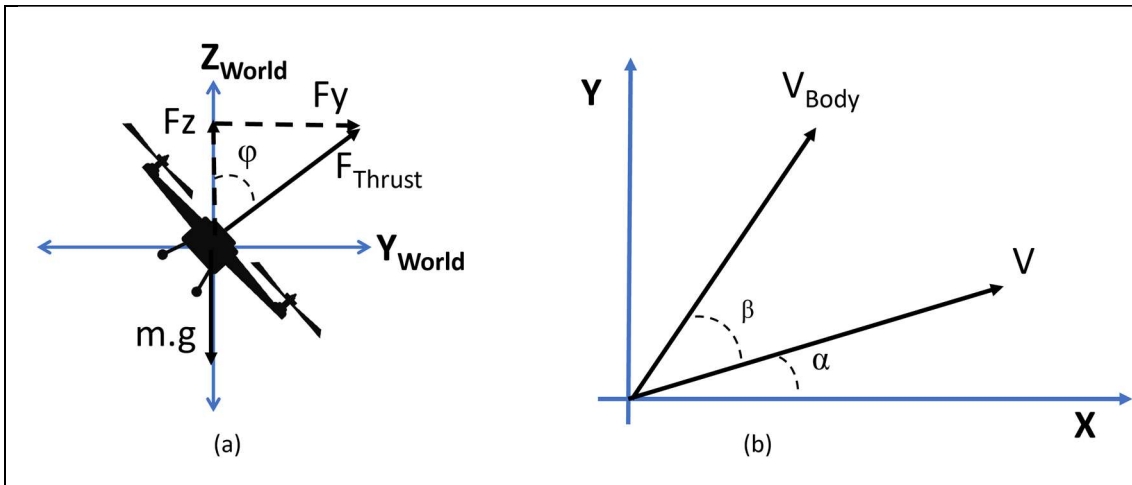


Figura 5 - a) Movendo nas direções z, x e y e b) Matriz de Rotação.

Quando um drone está parado, ele está alinhado com o referencial inercial, o que significa que seu eixo Z está na mesma direção do campo gravitacional da Terra. Nesse caso, se um drone deseja subir, ele só precisa ajustar a velocidade de rotação adequada das hélices e pode começar a se mover na direção z de acordo com a equação da força total gerada.

$$F_z = \left( \sum_{i=1}^4 F_i \right) - (m \cdot g) \quad (10)$$

No entanto, se o drone quiser se mover nas direções x ou y, ele precisa primeiro se orientar fazendo o ângulo theta ou phi necessário.

Quando isso acontece, a força total de empuxo gerada pelos quatro propulsores ( $F_{\text{empuxo}}$ ) tem uma componente na direção z e nas direções x e y, conforme mostrado na figura 5.

Para o exemplo mostrado acima, usando trigonometria básica, é possível encontrar a força direcional z e y usando a seguinte equação, onde phi é o ângulo formado pelo eixo z do corpo do drone com o quadro mundial.

$$F_y = F_{\text{empuxo}} * \sin\phi \quad (11)$$

$$F_z = F_{\text{empuxo}} * \cos\phi \quad (12)$$

No caso em que o drone se move no eixo x, podemos encontrar a força direcional z e y usando a seguinte equação, onde phi é o ângulo formado pelo eixo z do corpo do drone com o quadro mundial:

$$F_x = F_{\text{empuxo}} * \sin\theta \quad (13)$$

$$F_z = F_{\text{empuxo}} * \cos\theta \quad (14)$$

### 3.2.3 Sistema de Referência Mundo e Corpo

Para medir os ângulos de inclinação theta, phi e psi mencionados acima, normalmente é utilizado um sensor IMU embarcado no drone. Um sensor IMU (Unidade de Medição Inercial) é um dispositivo que combina sensores inerciais (giroscópios e acelerômetros) para fornecer dados de aceleração e orientação que podem ser usados para calcular a posição e a velocidade de um drone.

O IMU mede a rapidez com que o corpo do drone está girando em torno de seu próprio eixo e fornece essa velocidade angular como saída. Ao processar as saídas do IMU, é importante ter cuidado e entender que as velocidades angulares enviadas por ele não são em relação ao sistema de referência global (World frame), mas sim em relação ao seu próprio sistema de referência local (Body Frame). Por causa disso, é necessário utilizar métodos de conversão, como a matriz de rotação com ângulos de Euler. O diagrama acima mostra ambos esses sistemas de referência para referência.



Ângulos de Euler são um método que utiliza três ângulos para descrever a orientação de um corpo rígido em relação a um sistema de coordenadas fixo [10]. Eles são tipicamente representados como phi ( $\varphi$ ) para rotação no eixo x, theta ( $\theta$ ) para rotação no eixo y e psi ( $\psi$ ) para rotação no eixo z. Qualquer orientação pode ser descrita por meio da combinação desses ângulos. A Figura 1 representa os ângulos de Euler para um robô aéreo de múltiplos rotores.

Essas rotações elementares podem ocorrer em torno dos eixos do sistema de coordenadas fixo (sistema de referência global, com rotações extrínsecas) ou em torno dos eixos de um sistema de coordenadas rotativo (por exemplo, um sistema de coordenadas acoplado ao drone), que inicialmente está alinhado com o sistema fixo e modifica sua orientação após cada rotação elementar (rotações intrínsecas).

Para converter coordenadas do Sistema de Referência do Corpo (Body Frame) para o Sistema de Referência Global (World Frame) e vice-versa, é utilizado uma matriz de rotação 3x3 chamada Matriz de Rotação. Ou seja, se  $V$  é um vetor nas coordenadas globais e  $V_b$  é o mesmo vetor expresso nas coordenadas do corpo fixo, as seguintes relações são válidas:

$$V_b = R * V \quad (15)$$

$$V = R' * V_b \quad (16)$$

onde  $R$  é a Matriz de Rotação e  $R'$  é a sua transposta.

Para entender completamente essa relação, é importante começar pelo entendimento da rotação em 2D, considerando a Figura 4. Suponha que o vetor  $V_{\text{mundo}}$  seja rotacionado por um ângulo  $\beta$  para obter o novo vetor  $V'$ .

$$\text{Let } r = |V| \quad (17)$$

Então, temos as seguintes relações:

$$v_x = r * \cos\alpha \quad \text{and} \quad v_y = r * \sin\alpha \quad (18)$$

$$v_{bx} = r * \cos(\alpha + \beta) \quad \text{and} \quad v_{by} = r * \sin(\alpha + \beta) \quad (19)$$

Expandindo isso, obtemos:

$$v_{bx} = r * (\cos\alpha * \cos\beta - \sin\alpha * \sin\beta) \quad (20)$$

$$v_{by} = r * (\sin\alpha * \cos\beta + \cos\alpha * \sin\beta) \quad (21)$$

$$v_{bx} = v_x * \cos\beta - v_y * \sin\beta \quad (22)$$

$$v_{by} = v_y * \cos\beta + v_x * \sin\beta \quad (23)$$

Isso é exatamente o que se espera, porque o ponto desejado Vcorpo é descrito em termos do ponto original Vmundo e do ângulo atual  $\beta$ . Em conclusão, podemos escrever isso em notação de matriz como:

$$\begin{bmatrix} vb_x & vb_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x & v_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta \\ -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (24)$$

Ir de 2D para 3D é relativamente simples no caso da Matriz de Rotação. Na verdade, a matriz 2D obtida pode ser considerada como uma matriz de rotação 3D para rotação em torno do eixo z. Portanto, para uma rotação em torno do eixo z ( $R_Z(\beta)$ ), a Matriz de Rotação seria:

$$R_Z(\beta) = \begin{bmatrix} vb_x & vb_y & vb_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & \sin\beta & 0 \\ -\sin\beta & \cos\beta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (25)$$

Onde: os valores 0, 0, 1 na última linha e coluna indicam que as coordenadas z do ponto rotacionado ( $v'_z$ ) são iguais às coordenadas z do ponto original ( $v_z$ ).

Essa Matriz é denominada de Matriz de Rotação em torno do eixo Z de  $R_z(\beta)$ . Extrapolando a mesma lógica para rotações em torno dos eixos x e y, se obtém os valores para  $R_X(\beta)$  e  $R_Y(\beta)$  da seguinte forma:

$$R_X(\beta) = \begin{bmatrix} vb_x & vb_y & vb_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\beta & \sin\beta \\ 0 & -\sin\beta & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$R_Y(\beta) = \begin{bmatrix} vb_x & vb_y & vb_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x & v_y & v_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} \quad (27)$$

E o valor final para a Matriz de Rotação 3D do movimento será o produto cruzado das três Matrizes de Rotação acima.

$R = R_z(\psi) \times R_y(\theta) \times R_x(\phi)$ , onde psi ( $\psi$ ), phi ( $\phi$ ) e theta ( $\theta$ ) são as rotações em torno dos eixos z, y e x, respectivamente.

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = R_\phi R_\theta R_\psi \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (28)$$

A equação final é obtida após a inserção das matrizes correspondentes a  $R_z(\psi)$ ,  $R_y(\theta)$  e  $R_x(\varphi)$ :

### 3.2.4 Vetor de Estado e sua Derivada

Um drone quadcóptero possui 6 graus de liberdade, portanto, é necessário rastreá-lo monitorando esses seis parâmetros juntamente com suas derivadas para obter uma estimativa precisa da posição do drone e da velocidade de movimento. Isso é feito mantendo o vetor de estado e seu vetor de variação definidos, respectivamente, nas equações 29 e 30:

$$X = [x, y, z, \varphi, \theta, \psi, \dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, p, q, r] \quad (29)$$

e sua derivada na equação 30:

$$\dot{X} = [\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}, \dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}, \ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}, \dot{p}, \dot{q}, \dot{r}] \quad (30)$$

onde:

- $x, y$  e  $z$  são as coordenadas do drone no eixo de referência global;
- $\dot{x}, \dot{y}$ , e  $\dot{z}$  são velocidades definidas no eixo de referência global;
- $\varphi, \theta, \psi$  representam a altitude do drone no eixo de referência global;
- $\dot{\varphi}, \dot{\theta}, \dot{\psi}$  representam a taxa de variação dos ângulos (de Euler);
- $p, q, r$  são as velocidades angulares no eixo relativo ao drone;
- $\dot{p}, \dot{q}$  e  $\dot{r}$  são a aceleração angular no eixo relativo ao drone;
- $\ddot{x}, \ddot{y}, \ddot{z}$  representam as acelerações lineares no eixo do observador.

Um vetor de estado é uma representação matemática do estado atual do sistema. É um conjunto de variáveis que caracterizam o estado interno do sistema em um determinado momento. O vetor de estado contém todas as informações necessárias que permitem a previsão do comportamento futuro do sistema.

A definição de uma expressão de vetor de estado e sua variação é um aspecto fundamental das técnicas de Análise de Vetor de Estado (SVA ou AVE) usadas na teoria de sistemas de controle. SVA é uma técnica matemática usada para analisar e projetar controladores para sistemas dinâmicos. Ele fornece uma

estrutura para representar e analisar o comportamento de um sistema em termos de suas variáveis de estado. A ideia básica por trás do SVA é modelar um sistema dinâmico usando um conjunto de equações diferenciais, que descrevem como as variáveis de estado mudam ao longo do tempo. Essas variáveis de estado representam os estados internos ou variáveis do sistema que caracterizam seu comportamento.

Para aplicar o SVA, o primeiro passo é determinar a representação do espaço de estados do sistema. Isso envolve expressar a dinâmica do sistema como um conjunto de equações diferenciais de primeira ordem, tipicamente na forma matricial. Uma vez que o sistema é representado na forma de espaço de estados, o próximo passo é analisar seu comportamento e projetar um controlador.

Neste trabalho, o DTP precisa de um componente controlador interno para alterar as velocidades dos quatro rotores virtuais de um quadróptero digital de acordo com os comandos enviados pela interface humana utilizada, da mesma forma que um drone real faria. Além disso, espera-se que o DTP seja usado em simulações futuras envolvendo o uso do DTP em espaços virtuais correspondentes a locais onde um drone real seria testado.

### **3.3 Aquisição de Dados e Seleção do Modelo**

Esta etapa envolve a coleta de dados relevantes do sistema físico para construir uma representação precisa no gêmeo digital. Isso pode incluir dados de sensores em tempo real, dados históricos e outras informações relevantes, como registros de manutenção, fatores ambientais ou parâmetros operacionais. Esses parâmetros dependem do IPD usado na modelagem.

Neste trabalho, foi escolhido um drone da DJI. É o DJI Tello mini drone com apenas 80g. Ele possui um framework de desenvolvimento para os usuários e é facilmente encontrado no mercado.

Outra atividade importante consiste na seleção das técnicas de modelagem apropriadas com base nas características do sistema e nos objetivos do gêmeo digital. Isso pode envolver o uso de modelos baseados em física, modelos baseados em dados, modelos estatísticos ou uma combinação dessas

abordagens. O modelo selecionado é desenvolvido posteriormente para formar a base do gêmeo digital.

Neste trabalho, o processo de modelagem começa com a criação de uma representação virtual do IPD a partir de um drone real, considerando suas características físicas, dimensões e comportamento de acordo com a formulação matemática apresentada anteriormente nesta seção.

As características físicas visuais são definidas a partir de um conjunto de imagens de um drone DJI Tello real. Essas imagens são usadas para criar uma representação tridimensional do objeto que pode ser manipulada computacionalmente para criar uma interface para mover o objeto de acordo com o comportamento esperado para o DTP.

### **3.4. Integração e Validação do Modelo**

A integração e validação do modelo envolvem a calibração dos modelos usando dados disponíveis para garantir sua precisão e confiabilidade. Validar os modelos com base em observações e medições do mundo real para avaliar seu desempenho e ajustá-los, se necessário. Também envolve a integração dos modelos calibrados em uma plataforma de gêmeo digital coesa. Isso envolve o projeto da arquitetura, infraestrutura e componentes de software necessários para dar suporte à funcionalidade do gêmeo e à interação com o sistema físico.

A parte final desta etapa é estabelecer um mecanismo para coletar continuamente dados em tempo real do sistema físico e alimentá-los no gêmeo digital. Isso permite que o gêmeo reflita o estado atual e o comportamento do sistema físico, possibilitando monitoramento, análise e previsão em tempo real.

### **3.5 Interfaces do Usuário e Implementação**

A visualização e a interface do usuário consistem no desenvolvimento de uma interface amigável que permite aos usuários interagir com o gêmeo digital, visualizar suas saídas e acessar informações relevantes. Essa interface deve fornecer insights, análises e recomendações acionáveis com base na análise do gêmeo.

A Figura 7 mostra a interface para o controle do IPD e do DTP em sua versão 0.4. Foi desenvolvida em linguagem Python usando as bibliotecas tkinter, opencv-python, pyvista e as bibliotecas SDK da DJI Tello.

- a) Tkinter é uma ligação Python para a biblioteca de ferramentas GUI Tk. É a interface Python padrão para a biblioteca de ferramentas GUI Tk e é a GUI padrão de fato do Python. Esta biblioteca foi usada na construção da interface principal do protótipo.
- b) OpenCV-python (Open Source Computer Vision) para Python é uma popular biblioteca de código aberto que fornece uma ampla gama de funções de visão computacional e processamento de imagens. É projetada para ser uma ferramenta abrangente para lidar com tarefas relacionadas à análise de imagens e vídeos, detecção e rastreamento de objetos, e aprimoramento de imagens. Esta biblioteca foi usada para a manipulação do vídeo obtido da câmera do drone controlado.
- c) PyVista é uma coleção de rotinas para visualização 3D e análise de malhas que é usada como uma biblioteca auxiliar para o Visualization Toolkit (VTK). Esta biblioteca foi usada no controle do gêmeo digital e suas movimentações no espaço 3D.
- d) O SDK (Software Development Kit) do drone DJI Tello é um conjunto de ferramentas de software, bibliotecas e documentação fornecidas pela DJI especificamente para desenvolvedores que desejam criar aplicativos, software ou interagir com o drone DJI Tello. O SDK permite que os desenvolvedores acessem e controlem várias características e funcionalidades do drone Tello usando seu próprio software ou aplicativos personalizados. O SDK da DJI Tello oferece os seguintes componentes principais:
  - Protocolo de Comando: O drone Tello se comunica com dispositivos externos ou aplicativos usando um protocolo de comando específico. O SDK permite que os desenvolvedores enviem comandos e recebam respostas do drone.
  - Bibliotecas de Software: O SDK inclui bibliotecas de software ou

APIs que fornecem uma interface de nível superior para interagir com o drone Tello. Essas bibliotecas abstraem os detalhes de comunicação de baixo nível e fornecem funções e métodos convenientes para controlar o voo do drone, capturar imagens ou vídeo e acessar dados do sensor.

- Ferramentas de Desenvolvimento: O SDK pode fornecer ferramentas de desenvolvimento, como emuladores de software ou simuladores, que permitem que os desenvolvedores testem e depurem seus aplicativos sem precisar de acesso físico ao drone Tello. Essas ferramentas ajudam na fase de desenvolvimento e prototipagem, permitindo que os desenvolvedores validem seu código antes de implantá-lo em um drone real.
- Documentação e Código de Exemplo: O SDK geralmente é acompanhado de uma documentação detalhada que explica as funcionalidades, o uso e a integração dos componentes do SDK. Ele fornece orientações sobre como se conectar ao drone, enviar comandos, receber dados e lidar com vários eventos.

O SDK da DJI Tello permite que os desenvolvedores criem uma ampla variedade de aplicativos e soluções que ampliam as capacidades do drone Tello.

Na Figura 6, há seis grupos de comandos representados como conjuntos de botões. Eles são: a) Comandos Gerais; b) Controle do Digital Twin; c) Controle de Rotação; d) Controle de Movimento; e) Controle de Flip; e f) Automação de Movimento por Script.

O primeiro grupo de botões permite que o DTP se conecte a um drone real, controle sua decolagem, ative a câmera do drone para mostrar um vídeo ou tirar uma foto do que está no foco da câmera, controle seu pouso e desconecte-se do drone que estava sob o controle do DTP.

O segundo grupo de botões permite que o usuário do DTP ative o controle gráfico do digital twin (com renderização ou não) e mostre a representação do

digital twin com animação ou não dentro de um cenário de realidade aumentada usando o vídeo da webcam onde o protótipo está sendo executado.

O terceiro grupo de botões mostra botões para fazer o drone girar em torno do eixo z (YAW). Ele pode ser girado 90 graus para a direita ou para a esquerda e pode ser girado para a direita em 180 graus.

O quarto grupo de botões controla os movimentos do drone ao longo dos eixos x, y e z. Com esses controles, ele pode avançar, recuar, mover-se para a esquerda, mover-se para a direita, subir e descer.

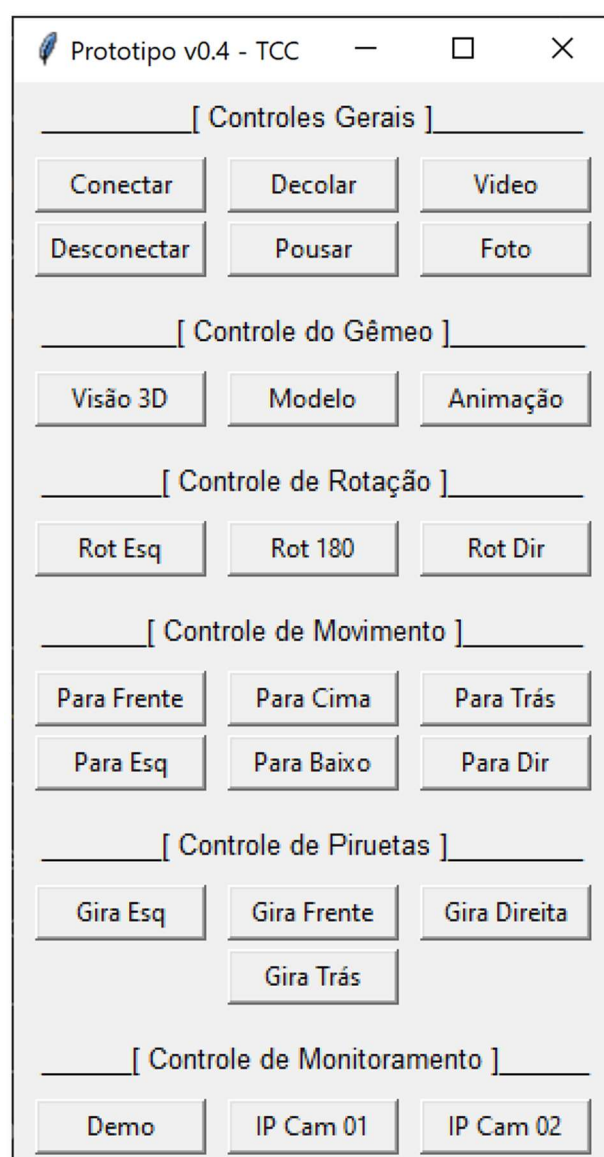


Figura 6 – Interface gráfica utilizada para controlar o protótipo.



O quinto grupo de botões controla o movimento de flip em quatro possibilidades diferentes: flip para frente, flip para trás, flip para a direita e flip para a esquerda.



Figura 7 – Interface gráfica utilizada para controlar o protótipo.

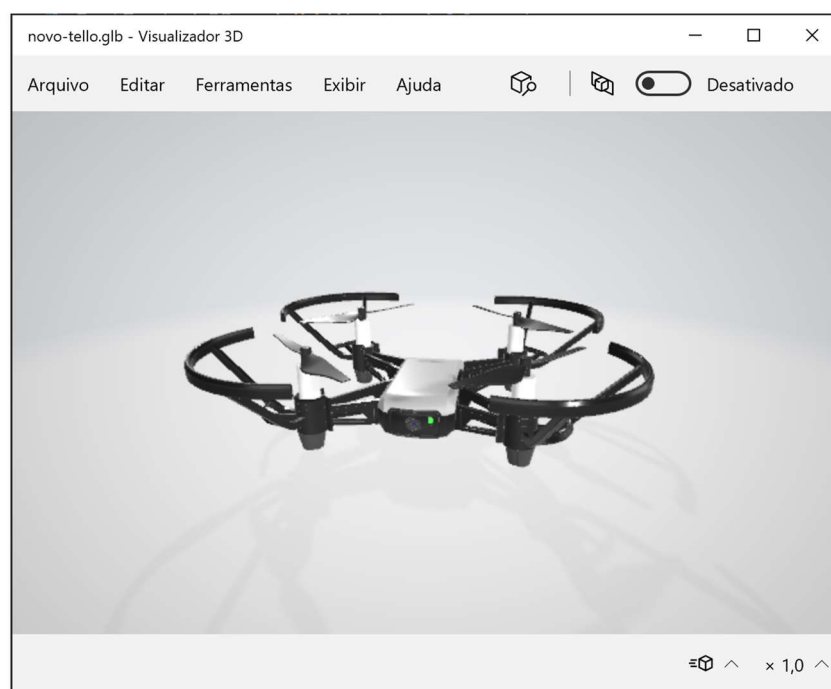


Figura 8 – O protótipo sendo apresentado com renderização.

O sexto grupo de botões controla a automação de sequências para permitir que o drone se mova por rotas complexas envolvendo todos os tipos possíveis de movimentos em combinação. Há três botões nesse grupo. O primeiro faz o IPD seguir uma rota por uma sala de laboratório, parando em alguns pontos de observação e, após alguns minutos, seguindo para outro ponto até chegar ao último deles. Após o último ponto, ele começa a voltar para casa e pousa no mesmo ponto de decolagem usado para iniciar a rota. Os outros dois botões fazem o drone visitar duas câmeras IP disponíveis no laboratório.

Na Figura 8, a janela de manipulação gráfica para o protótipo de gêmeo digital é apresentada com o modelo 3D criado para o drone usado no trabalho. Nesta interface, o usuário poderá usar o mouse ou o teclado para movimentar livremente o gêmeo digital no espaço de coordenadas 3D formado pelos eixos X, Y e Z apresentados anteriormente.

A Figura 8 mostra como objeto 3D usado para representar o drone usado no trabalho pode ser renderizado e manipulado no espaço 3D utilizado.

## 4 RESULTADOS

Nesta seção, o comportamento do protótipo DTP é testado nos três cenários mostrados nas figuras 1 e 2. Ao longo desses testes, as principais características e funcionalidades são validadas e verificadas. Isso envolve validar a precisão do modelo usado no gêmeo digital, comparando as previsões com medidas ou observações do mundo real e analisando o nível de concordância entre as saídas do gêmeo e o comportamento real do sistema físico.

No primeiro cenário, o DTP foi usado para controlar um drone real por meio dos botões de interface mostrados nos grupos 1, 3, 4 e 5 da figura 5. Todas as funcionalidades associadas a esses botões funcionaram conforme o esperado. No entanto, houve um problema com a captura do vídeo da câmera quando ela estava ativada durante a ação de movimento do DTP. A imagem congelava com frequência durante a reprodução do vídeo na interface do DTP.

A solução para esse problema foi o uso de uma thread de processamento diferente para lidar com o vídeo. Essa solução incluiu outra biblioteca no programa final, a biblioteca `threading` do Python. A biblioteca `threading` no Python fornece uma maneira de criar e gerenciar threads dentro de um programa. As threads permitem a execução simultânea de várias tarefas, permitindo a execução paralela de código e melhorando o desempenho de certos tipos de aplicativos. Essa alteração no código melhorou significativamente a qualidade da imagem mostrada na interface.

No segundo cenário, o DTP foi usado para controlar uma representação virtual do IPD, permitindo a conversão das coordenadas do quadro do corpo para as do quadro mundial, enquanto o usuário move o modelo graficamente na interface.

Nas Figuras 8, 9 e 10, o IPD é modelado por um objeto 3D que pode ser movido pelo mouse ou teclado, enquanto suas coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$  são capturadas, convertidas de acordo com a equação 30 e impressas na tela.

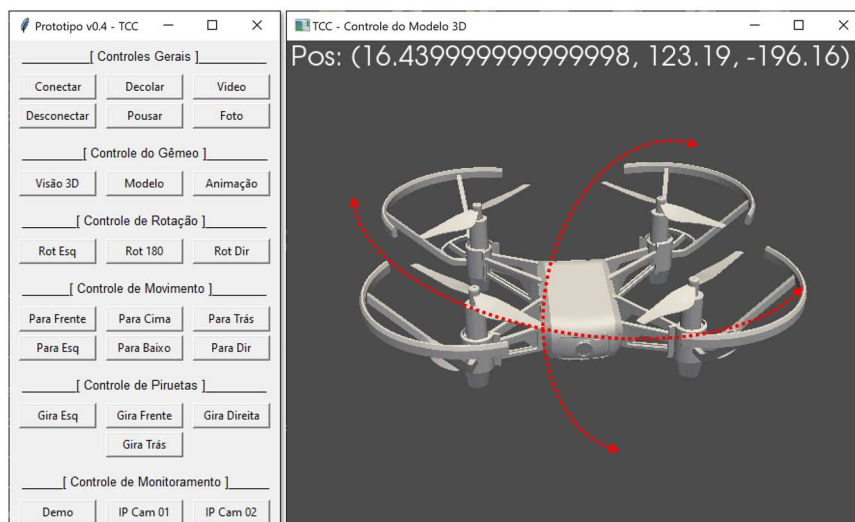


Figura 9 – Interface gráfica utilizada para controlar o protótipo

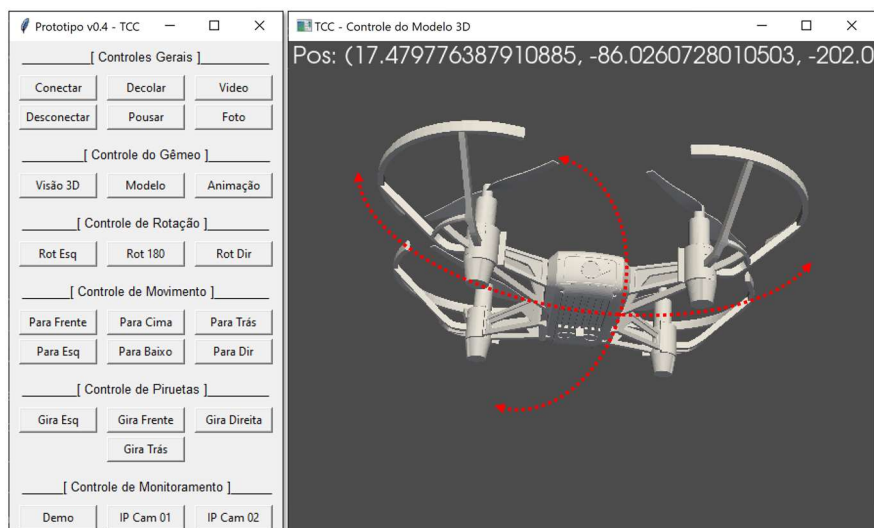


Figura 10 – controlar o DTP durante a rotação de inclinação (pitch).

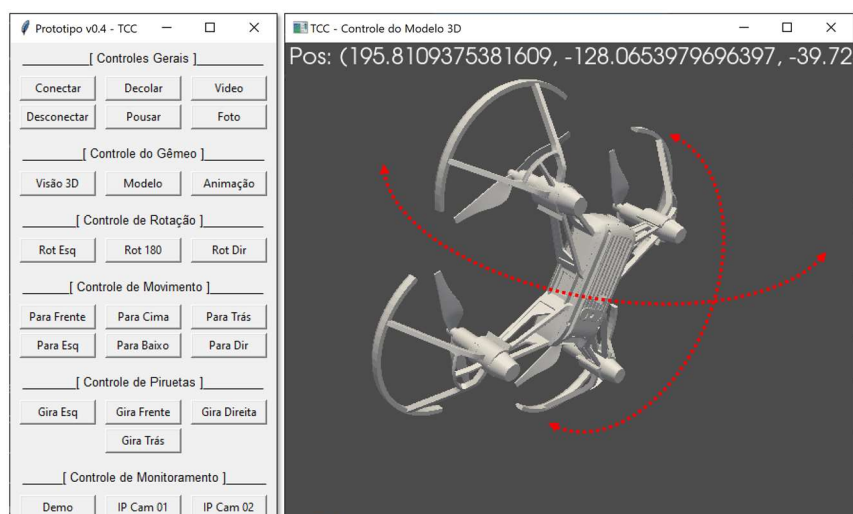


Figura 11 – o IPD durante as rotações de inclinação (pitch) a partir de um ponto de vista diferente.

Quando as coordenadas obtidas pelo DTP são comparadas com as coordenadas reais de um IPD voando e atuando em um ambiente real, é fácil perceber uma diferença em seus valores causada pela ação de variáveis externas, como vento, resistência do ar, entre outros.

De qualquer forma, é possível fazer alterações adicionais no DTP para considerar os efeitos dessas forças no modelo matemático utilizado. Nesse caso, o IPD seria testado dentro de um ambiente virtual que poderia ser relacionado a um local real onde seu voo deveria ocorrer.

A Figura 12 mostra como isso poderia ser implementado na sobreposição do objeto 3D sobre o vídeo capturado pela webcam em que o software do DTP está em execução.

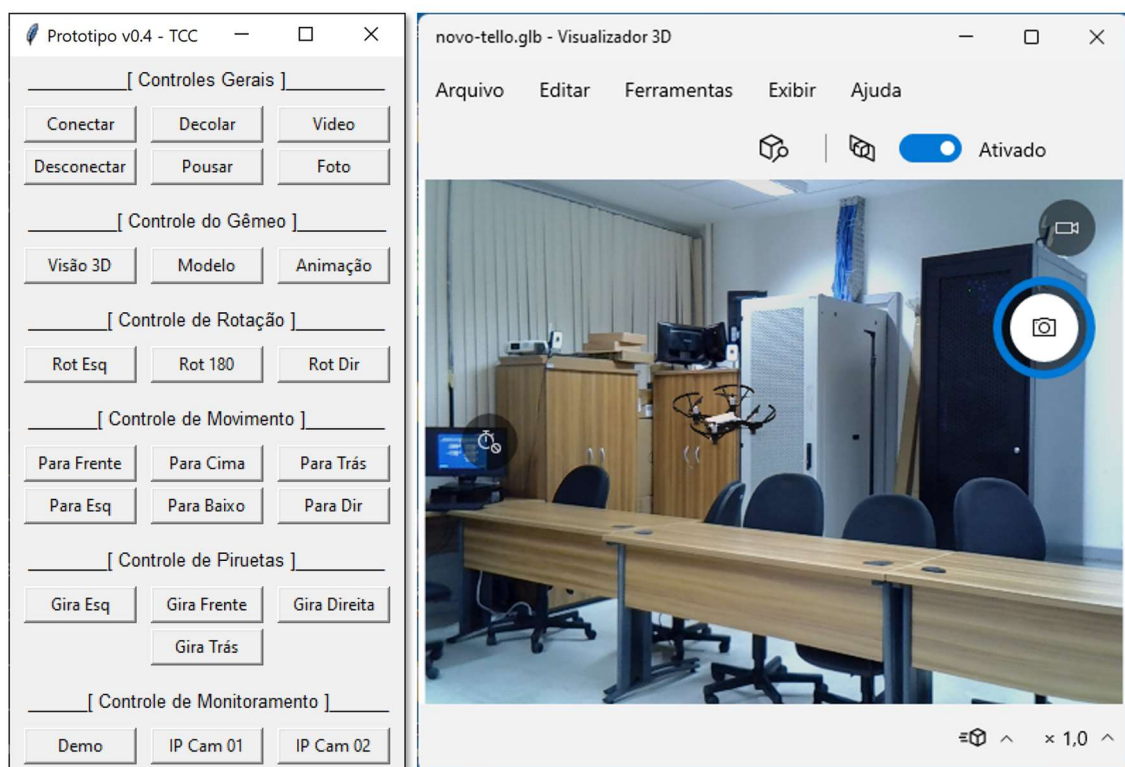


Figura 12 – Interface gráfica usada para controlar o DTP mostrando-o em execução na realidade aumentada.

No terceiro cenário, são disparadas três sequências de movimento com os botões: "Demo", "IP Cam 1" e "IP Cam 02". Nesse caso, o controle remoto é substituído pela interação automatizada entre o DTP e o IPD, sem intervenção do usuário. Três sequências de movimentos foram programadas para fazer o IPD executar esses movimentos automatizados.

A primeira delas é uma demonstração ("Demo") da ação de movimento do IPD em todo o laboratório. A segunda e a terceira são demonstrações de como o IPD pode ser usado para investigar o status de duas câmeras IP instaladas no laboratório. No caso da segunda e terceira demonstrações, o drone se movimenta pela sala até atingir a posição de cada câmera e gira em torno para filmar posições não alcançadas pela câmera. Depois da filmagem, retorna para a posição inicial de partida.

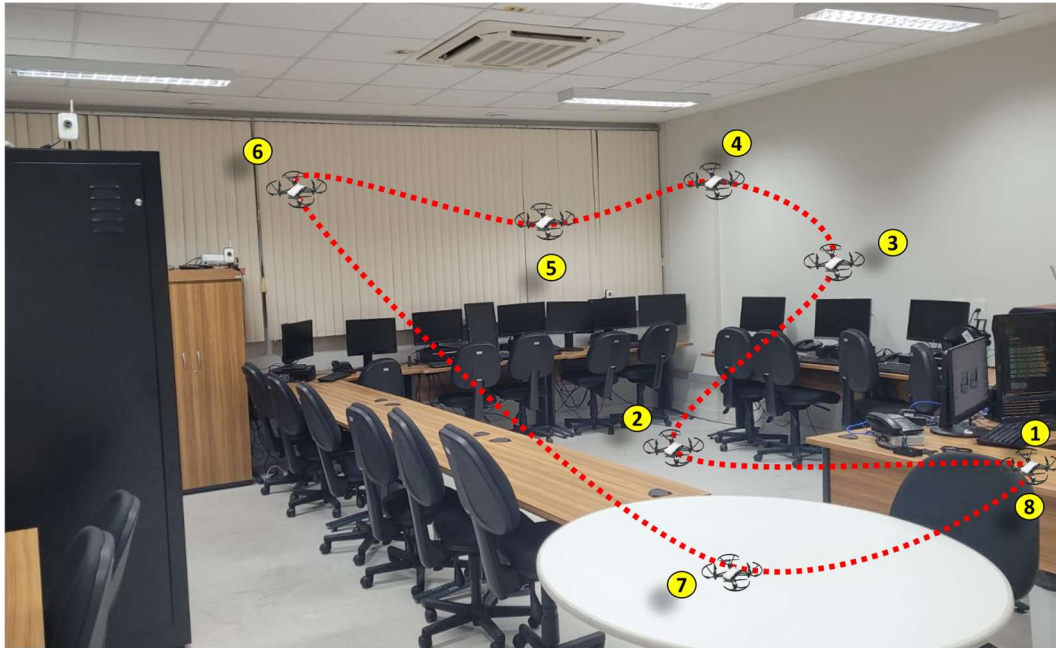


Figura 13 – Diagrama mostrando o movimento do IPD ao longo da automação de demonstração acionada após o botão "Demo".

A Figura 13 abaixo mostra como o IPD se comporta após o botão "Demo" ser pressionado. O caminho automatizado é definido para fazer o drone passar pelos pontos de "1" a "7" e retornar ao ponto de partida no final da sequência ("8").

Na figura 14, após algumas tentativas de movimentos automatizados, foi observada uma certa imprecisão nos movimentos, pois o drone DJI Tello é um equipamento muito simples e não possui funcionalidade de GPS para permitir um posicionamento mais preciso. Além disso, foi possível observar que diversos outros fatores influíram na movimentação do drone dentro do laboratório, tais como: interferência com os roteadores sem fio presentes nas proximidades do

drone e a ventilação das duas saídas do ar condicionado central presentes no teto do laboratório.

Outra limitação importante observada é a necessidade de um novo carregador de bateria que possa ser usado para recarregar a bateria do drone sem removê-la do drone. A bateria do DJI Tello é carregada fora do drone, o que requer intervenção humana para trocar a bateria entre os movimentos automatizados quando uma bateria acaba.

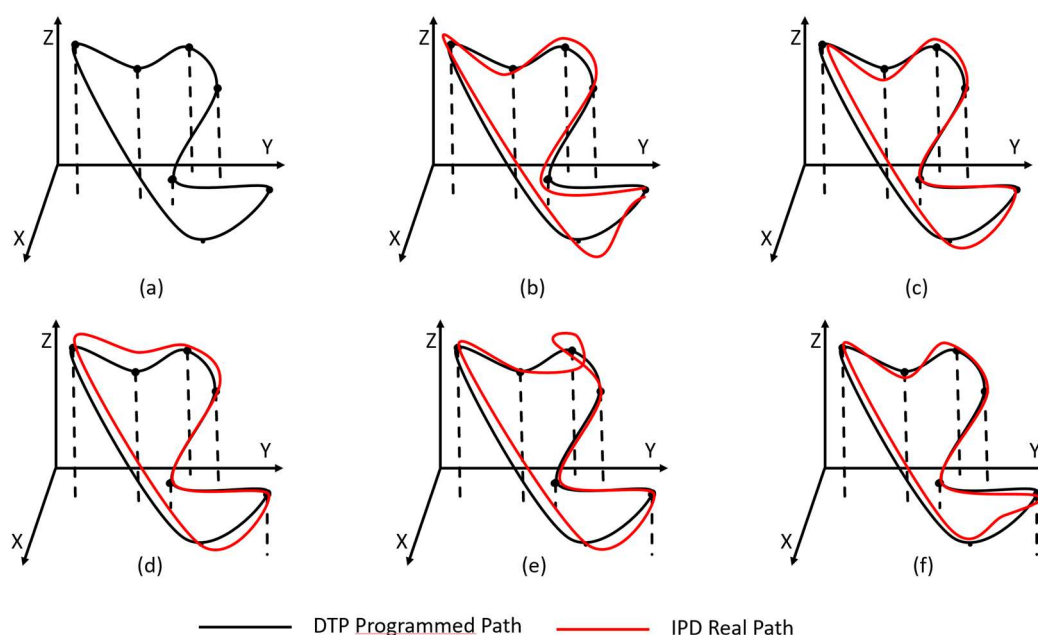


Figura 14 - Caminhos observados para o DTP e o IPD nas experimentações.

Na figura acima, um conjunto de eixos tridimensional ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) representa o espaço da sala onde o drone foi testado para realizar uma das sequencias de movimentação. A marcação na cor preta representa o caminho idealizado para a movimentação do drone. A marcação em vermelho representa o caminho realizado pelo drone em diversos experimentos de movimentação pelo caminho idealizado. Apesar da proximidade entre o caminho idealizado e as diversas variações em vermelho foi possível observar algumas diferenças entre os caminhos mostrados que foram causadas pela imprecisão do drone e pelos agentes presentes no laboratório que foram mencionados anteriormente. Apesar destas diferenças, o erro observado não foi suficiente para impedir ou afetar a movimentação e registro feito pelo drone ao longo da sequencia de comandos fornecida.

## 5. DISCUSSÃO

O primeiro cenário mostrou que um IPD pode ser totalmente controlado por um DTP, pois todos os tipos de movimentos podem ser realizados sob o controle do DTP. A principal implicação relacionada com esse cenário é que um gêmeo digital deste tipo pode permitir o uso de um ou mais drones em ambientes virtuais ou de realidade aumentada sem a necessidade de adquirir ou usar um drone real. Além disso, isso proporcionaria a modelagem de diferentes tipos de drones, permitindo o uso virtual de drones muito caros ou difíceis de encontrar.

Outra perspectiva muito interessante resultante do uso bem-sucedido do protótipo DTP no segundo cenário de uso é a possibilidade de modelar enxames de drones por meio de enxames de gêmeos digitais. Esses enxames são controlados em redes chamadas de IoD (Internet das Coisas), e têm sido apresentados em shows que substituem fogos de artifício na China.

A possibilidade de controlar um IPD a partir do DTP abre duas oportunidades importantes. A primeira é a operação sincronizada do DTP juntamente com o movimento de um IPD em um espaço real. A segunda é a possibilidade de controle distribuído por meio de uma conexão compartilhada entre o DTP e o IPD. Essa possibilidade é interessante porque, quando um controle remoto se conecta a um drone, impede que outro controle remoto se conecte ao mesmo drone para controlá-lo.

Com relação ao terceiro cenário, sua implementação bem-sucedida também abre muitas oportunidades, uma vez que o mundo está rapidamente adotando a era das tecnologias autônomas, e uma área onde seu potencial brilha intensamente é na operação autônoma de drones. Os drones agora se tornaram ferramentas versáteis com vastas aplicações em várias indústrias. A integração da autonomia nos drones abriu um novo campo de possibilidades, revolucionando áreas como logística, agricultura, produção cinematográfica, inspeção de infraestrutura e resposta a emergências.

Os drones autônomos trazem níveis incomparáveis de eficiência e produtividade para diversas indústrias. Com a capacidade de operar de forma independente, os drones podem realizar tarefas mais rapidamente e com mais



precisão do que os métodos tradicionais. Em setores como agricultura, drones autônomos equipados com sensores avançados podem monitorar plantações, detectar doenças e otimizar a irrigação, resultando em maior rendimento e redução do desperdício de recursos. Da mesma forma, na logística e entrega, os drones autônomos possibilitam o transporte rápido e econômico de mercadorias, eliminando as restrições de tráfego e reduzindo a dependência do trabalho humano.

A segurança é uma preocupação em muitas aplicações industriais reais, e a operação autônoma de drones oferece vantagens significativas na mitigação de riscos. Ao remover operadores humanos de ambientes perigosos, os drones podem realizar inspeções em áreas de alto risco, como usinas de energia e regiões afetadas por desastres.

A operação autônoma de drones está alinhada com diversos esforços em prol da sustentabilidade e da minimização do impacto ambiental. Os drones oferecem uma alternativa ecologicamente correta aos métodos de transporte tradicionais, reduzindo as emissões de carbono associadas aos veículos tripulados.

As aplicações potenciais da operação autônoma de drones são enormes. Desde sistemas de transporte aéreo até planejamento urbano, de mapeamento 3D à agricultura de precisão, os drones autônomos têm a capacidade de revolucionar inúmeras indústrias. À medida que a tecnologia continua avançando, podemos esperar uma maior miniaturização, maior vida útil da bateria e capacidades aprimoradas nos drones, abrindo portas para novas aplicações na área da saúde, construção, segurança pública e entretenimento.

O uso da operação autônoma de drones impulsiona a inovação e transforma indústrias em todo o mundo. Desde o aumento da eficiência e produtividade até a segurança e mitigação de riscos, da sustentabilidade ambiental à análise de dados inovadora, a importância e as possibilidades dos drones autônomos são inegáveis. Abraçar essa tecnologia e fomentar seu desenvolvimento contínuo nos permitirá desbloquear seu pleno potencial e moldar um futuro em que os drones autônomos desempenhem um papel fundamental na melhoria de nossas vidas e da sociedade como um todo.

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a especificação e implementação de um protótipo de interface de gêmeo digital para controlar um drone programável indoor em três cenários diferentes. Os resultados apresentaram uma operação bem-sucedida do protótipo em todos os cenários considerados, permitindo a operação do mesmo com as funcionalidades idealizadas para o mesmo.

Esses resultados oferecem possibilidades promissoras e várias vantagens em termos de eficiência e segurança. Quando aplicados ao controle de drones, os gêmeos digitais possibilitaram uma compreensão mais abrangente do comportamento, desempenho e ambiente do drone, o que leva a capacidades operacionais aprimoradas em todos os cenários apresentados.

Após os experimentos e testes apresentados, o protótipo demonstrou que o uso de gêmeos digitais para controlar drones oferece uma perspectiva promissora para a automação em geral.

Dois possíveis trabalhos futuros poderiam ser desenvolvidos a partir da experiência adquirida com o desenvolvimento do protótipo apresentado nas seções anteriores. O primeiro deles seria a inclusão no gêmeo digital de variáveis de comportamento observadas no drone real escolhido. Por exemplo, a curva de descarga da bateria do drone, as informações observadas nos sensores, etc. O segundo trabalho seria relacionado à troca do drone usado (o DJI Tello) por outros mais complexos e caros com características e sensores mais sofisticados, tais como o DJI Phantom ou o DJI Avata que possuem GPS, maior autonomia de bateria e um conjunto de sensores mais rico.

## REFERÊNCIAS

- [1] SIVAKUMAR, M.; MALLESWARI, N. **A Literature Survey of Unmanned Aerial Vehicle Usage for Civil Applications**. J. Aerosp. Technol. Manag., v. 13, 2021.
- [2] ATTARAN, M.; CELIK, B. G. **Digital Twins: Potentials, Ethical Issues, and Limitations**. Decision Analytics Journal, v. 6, mar. 2023.
- [3] JAVAID, M.; HALEEN, A.; SUMAN, R. **Digital Twin applications toward Industry 4.0: A Review**. Cognitive Robotics, v. 3, 2023, p. 71-92.
- [4] BHADADA, K. **Enhancing Innovation in Telecom with Digital Twins**. **Havard Business Review: Analytics Services**, White Paper, 2022.
- [5] JONES, D. et al. **Characterising the Digital Twin: A systematic literature review**. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, v. 29, part A, maio 2020, p. 36-52.
- [6] ZHANG, M. et al. **Digital twin data: methods and key technologies**. Setembro 2021.
- [7] QAMSANE, Y. et al. **A Methodology to Develop and Implement Digital Twin Solutions for Manufacturing Systems**. IEEE Access, v. 9, pp. 44247-44265, 2021. doi: 10.1109/ACCESS.2021.3065971.
- [8] NEWRZELLA, S. B.; FRANKLIN, D. W.; HAIDER, S. **Methodology for Digital Twin Use Cases: Definition, Prioritization, and Implementation**. IEEE Access, 5 jul. 2022.
- [9] SHIRSAT, A. R. **Modeling And Control of a Quadrotor Aircraft UAV**. Dissertação de mestrado. Arizona State University, 2015.

- [10] BIEDENHARN, L. C.; LOUCK, J. D. **Angular Momentum in Quantum Physics**. Reading, MA: Addison–Wesley, 1981.
- [11] SEGOVIA, Mariana; GARCIA-ALFARO, Joaquin. **Design, Modeling and Implementation of Digital Twins**. IEEE Sensors Journal, [s. l.], 20 jul. 2022.
- [12] NEWRZELLA, SEBASTIAN RICHARD; FRANKLIN, DAVID W. **Methodology for Digital Twin Use Cases: Definition, Prioritization, and Implementation**. IEEE Access, [s. l.], 15 jul. 2022.
- [13] LU, Yulong; MAHARJAN, Sabita; ZHANG, Yan. **Adaptive Edge Association for Wireless Digital Twin Networks in 6G**. IEEE Internet of Things Journal, [s. l.], 15 nov. 2021.
- [14] MINERVA, Roberto; LEE, Gyu Myoung; CRESPI, Noel. **Digital Twin in the IoT Context: A Survey on Technical Features, Scenarios, and Architectural Models**. IEEE Access, [s. l.], 25 set. 2020.
- [15] FULLER, Aidan; FAN, Zhong; DAY, Charles; BARLOW, Chris. **Digital Twin: Enabling Technologies, Challenges and Open Research**. IEEE Access, [s. l.], 23 jun. 2020.
- [16] BARRICELLI, Barbara Rita; CASIRAGHI, Elena; FOGLI, Daniela. **A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications**. IEEE Access, [s. l.], 2 dez. 2019.